



HAL
open science

Etude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté , massif du piton des neiges, Ile de la Réunion

Olivier Grünberger

► To cite this version:

Olivier Grünberger. Etude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté , massif du piton des neiges, Ile de la Réunion. Hydrologie. Université Paris Sud - Paris XI, 1989. Français. NNT: . tel-00865995

HAL Id: tel-00865995

<https://theses.hal.science/tel-00865995>

Submitted on 25 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ORSAY
n°Ordre : 827

Institut de recherche pour le développement

Dr. Grünberger Olivier



Land Development Department
Office of Science for Land Development



Institut de recherche
pour le développement

Phaholyotin Rd., (next to soi Phaholyotin 41) Chatuchak Bangkok 10900
Tel : (66) 2561-2726 Ext : 13 • Fax : (66) 2561-2186 • Mobile : (66) 1849-2180
E-Mail : olivier.grunberger@ird.fr • http://www.grunberger.fr/olivier

UNIVERSITE DE PARIS-SUD
CENTRE D'ORSAY

THESE

présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR EN SCIENCES

de l'Université de Paris XI (arrêté du 5 juillet 1984), spécialité :

Sciences de la Terre

par

Olivier GRUNBERGER

ETUDE GEOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DE L'INFILTRATION
SOUS CLIMAT TROPICAL CONTRASTE
- MASSIF DU PITON DES NEIGES -
- ILE DE LA REUNION -

Soutenue le 30 janvier 1989 devant la commission d'examen :

MM	R. BROUSSE	Président
	J.Ch. FONTES	Directeur de thèse
	J. COUDRAY	Rapporteur
	J.M. WACKERMANN	Rapporteur
	J.J. COLLIN	Examineur
	L. DEVER	Examineur

M. M. Massault, Ingénieur, (U.P.S.) pour son aide au ¹⁴ C, nos discussion philosophiques et son humour corrosif et désabusé,
M^{lle} A. Raguideau, assistant ingénieur, (C.N.R.S.) pour son sourire et son calme.

Enfin j'ai bénéficié de l'aide désintéressée de nombreuses personnes qui m'ont souvent apporté leur amitié, aussi je suis heureux de remercier :

Laurence Chery, pour son aide dans les moments les plus durs ainsi que son sens du collectif que j'admire,
Dimitri & Liana Poutoukis, πουρ λευρ αιδε ετ υνε χερταινε μανιερε δε ποιρ λα πιε,
Ian Douglas Clark, for his "hello frog !" and his study of french bad words,
Jean-Marie & Marie-Claire Garnier, pour m'avoir permis de me projeter dans l'avenir sans trop de dégâts,
Jean-Lambert Join, pour notre complicité, notre accord philosophique et son soutien moral,
Jean-Luc Michelot, pour les sulfates, mais aussi son flegme et son humour si britanniques,
Anne Gasparini, pour son aide, nos discussions et sa candeur,
Marc Moulin, pour un certain sens critique en commun,
Sophie Maurice, pour sa gentillesse et son "look" qui égaye quelque peu le labo,
Pascale Cuet, pour m'avoir appris le terme "faire charette avec des silicates",
Odile Naïm, pour m'avoir expliqué qu'une holoturie a des sentiments,
Michel, hélène, & Ivan Grünberger, pour m'avoir encouragé, subventionné, avoir supporté l'éloignement physique et constituer une famille formidable,
Emeric Grünberger, pour sa subvention de DEA, ses encouragements et son intérêt,
Claude, Rita, Kamala, Sita & Charmila Marius pour leurs encouragements multiples,
Norbert & Denise Trauth pour un cours particulier sur les argiles et leur gentillesse,
Eric Nicollini, pour Madagascar, bien sur, mais aussi nos discussions motivantes,
Brigitte Fougères, Sophie Duvocelle, Toutou Payet, Pour les fêtes, leurs aides et quand c'était trop dur, "gran' case à zot l'é dou" ...
Thierry Gandet, Thierry & Odile Bouche, pour s'être souvenu de nous,
Mimi, Momo & Hannah Doudoux, pour la Guadeloupe et pour nous avoir fait acheter un frigo,
Christelle Marlin, Elisabeth Gibert, Kamel Zouari, Christine Dubar, Jean-Denis Taupin, Regis Téhet, Phillipe Pradel, Kim Hô... et tant d'autres... qui m'ont accordé leur attention, leurs sourires, et fait l'ambiance sympathique du rez de chaussé du bâtiment 504.

A Catherine,

pour ta confiance, pour avoir fait semblant d'oublier ta carrière pour la mienne, pour avoir supporté :

- l'indigence, de temps en temps, à la Montagne (974) comme aux Ullis(91),
- un déménagement tout les six mois en moyenne,
- le travail semi- temporaire,
- la fin toujours remise et un "après" toujours aussi incertain,

Je te remercie et je te dedie ce travail, c'est bien la moindre des choses.

Les Ullis le 1/1/1989

MOTS CLES : Hydrogéologie en terrain volcanique - Climat tropical contrasté - Hydrochimie et isotopes du milieu - infiltration et évaporation dans les sols - Circulations souterraines - Océan Indien - Ile de la Réunion -

RESUME: L'étude chimique et isotopique des éléments dissous des eaux de pluie, de l'eau du sol et des eaux souterraines permet la mise en évidence des caractères principaux du cycle hydrique sur une île volcanique tropicale à climat contrasté comme la Réunion (21°7'S, 52°32'W).

La variation des teneurs chimiques dans les pluies montrent une influence marquée de la présence marine qui diminue avec le relief. La répartition des teneurs isotopiques des précipitations montre une distribution similaire en situation "normale" et fortement perturbée lors de la forte dépression tropicale Clotilda où les teneurs sont très appauvries. Cette variation naturelle des teneurs, due aux pluies à forte ascendance, constitue un signal que l'on s'est efforcé de retrouver dans l'eau des profils de sols et dans les points d'eau.

L'examen des teneurs des eaux dans les sols montre, qu'en bas de pente, dans le secteur aride de l'île, se produit une évaporation irréductible alimentée par les nappes libres. Plus haut, sur les versants, il se produit une infiltration que l'on a pu également quantifier.

Les analyses chimiques et isotopiques des eaux souterraines montrent que la minéralisation globale est bien représentée, loin de l'océan, par la minéralisation carbonatée essentiellement d'origine biogénique. La composition cationique des eaux reflète les compositions chimiques des roches qu'elles ont lessivées. D'autre part, les circulations souterraines ne suivent pas obligatoirement la pente générale du volcan. Les aquifères côtiers montrent une hydrochimie où l'influence marine est prédominante mais où apparaît un pôle de minéralisation carbonaté et sulfaté. L'analyse des isotopes du carbone et des sulfates a permis de mettre en évidence une influence non négligeable de la culture de la canne à sucre et des temps de transit des aquifères probablement inférieurs à 35 ans. Les aquifères de la côte ouest sont peu protégés de la pollution de bas de versant et toute mise en valeur de cette côte devra tenir compte de la sensibilité des aquifères aux sources de pollution.

KEY WORDS : Hydrogeology of volcanoes - Contrasted tropical climate - Hydrochemistry and environmental isotopes - infiltration and evaporation in soils - groundwater flows - Indian ocean - Reunion island -

ABSTRACT: Reunion island is located in the Indian ocean (21°7' S, 52°32' W) in the intertropical zone. Chemical and isotopic natural contents in rain waters, soil waters and groundwaters allow to study the water cycle upon the "Piton des Neiges" massif, which is an inactive strato-volcano.

Chemical contents in rain show a marine influence pondered by effects of the relief. Isotopic abundances of ^{18}O and ^2H have similar distributions which are strongly disturbed during the tropical hurricanes. These natural variations determine an "input" function and can be found in soils and aquifers.

The distribution of the abundances of ^{18}O in soil water in the west part of the island allows to quantify the evaporation rate from the groundwater table at a steady state. At higher altitude infiltration occurs and has also been quantified.

Groundwaters chemical analysis show that global salinity is related to the carbonate mineralization from biogenic CO_2 . Cation contents can be related to the geochemistry of weathered lavas.

Groundwater flow patterns do not necessarily follow the general slope of the volcano. Chemical contents of ground water from coastal aquifers not only show marine influence but also a carbonated and sulfated source of mineralisation. Carbon and sulfate isotopic contents illustrate the influence of cane sugar cultivation. The mean transit times are probably less than 35 years. All developing managements to come should take into account that western coastal aquifers are not protected from pollution.

SOMMAIRE

AVANT PROPOS
RESUME & ABSTRACT
SOMMAIRE
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION	p.1
I CADRE DE L'ETUDE	
I.1 Description du terrain d'étude	p.5
I.1.1 Situation géographique	p.5
I.1.2 Rappels historiques	p.5
I.1.3 Géographie humaine actuelle	p.5
I.1.4 Le relief	
I.1.4.1 Les pentes externes	p.6
I.1.4.2 Les remparts, les cirques et les ilets	p.6
I.1.4.3 Les vallées (rivières et ravines)	p.6
I.1.5 Le climat	
I.1.5.1 Les pluies	p.9
I.1.5.1.1 Répartition temporelle	p.9
I.1.5.1.2 Répartition spatiale	p.9
I.1.5.1.3 Typologie des pluies	p.11
I.1.5.1.3.1 Les pluies orographiques	p.11
I.1.5.1.3.2 Les pluies de perturbations	p.11
I.1.5.2 Les températures	p.11
I.1.5.2.1 Répartition temporelle	p.11
I.1.5.2.2 Répartition spatiale	p.11
I.1.5.3 Les vents	p.13
I.1.5.3.1 Répartition temporelle	p.13
I.1.5.3.2 Répartition spatiale	p.13
I.1.5.4 L'humidité relative	p.15
I.1.5.5 L'insolation	p.15
I.1.5.5.1 Variations temporelles	p.15
I.1.5.5.2 Variations spatiales	p.15
I.1.6 La géologie du Massif du Piton des Neiges	p.17
I.1.6.1 Les phases géologiques	p.17
I.1.6.1.1 La phase I	p.17
I.1.6.1.2 La phase II	p.17
I.1.6.1.3 La phase III	p.17
I.1.6.1.4 La phase IV	p.18
I.1.6.1.5 Structure globale	p.18
I.1.6.2 Evolution géochimique et minéralogique des laves	
I.1.6.2.1 Les laves non différenciées	p.18
I.1.6.2.2 Les laves différenciées	p.18
I.1.6.3 Tectonique	p.19
I.1.6.4 Pédologie	p.21

I.1.6.4.1 Les andosols	p.21
I.1.6.4.2 Les sols ferralitiques	p.21
I.1.6.4.3 Les podzols	p.21
I.1.7 Hydrologie du Massif du Piton des Neiges	p.22
I.1.7.1 Le régime des principaux cours d'eau du Massif	
I.1.7.2 Le ruissellement et l'infiltration	p.22
I.1.7.3 L'évapotranspiration	p.22
I.1.8 Hydrogéologie	p.25
I.1.8.1 Les types de circulations souterraines	p.25
I.1.8.2 La classification structurale des points d'eau	p.26
II ECHANTILLONNAGES ET MESURES	p.29
II.1 L'échantillonnage	p.31
II.1.1 Le prélèvement des eaux de pluies	p.31
II.1.1.1 Les prélèvements saisonniers des eaux de pluies	
II.1.1.1.1 Les dispositifs de prélèvements	p.31
II.1.1.1.2 Les sites choisis	p.31
II.1.1.1.3 Les prélèvements	p.31
II.1.1.2 Les prélèvements journaliers	p.32
II.1.2 Les prélèvements de l'eau des sols	p.32
II.1.2.1 Les prélèvements des sols	p.32
II.1.2.2 L'extraction de l'eau des sols	p.33
II.1.2.3 L'extraction des sels par lixiviation	p.33
II.1.2.4 L'estimation des teneurs volumiques	p.33
II.1.3 Le prélèvement des eaux souterraines	p.34
II.2 Les mesures effectuées et les méthodes employées	p.35
II.2.1 Les mesures de terrain	p.36
II.2.2 Les mesures des concentrations chimiques	p.35
II.2.3 Les mesures isotopiques	p.36
II.2.3.1 Les préparations pour la mesure au spectromètre de masse	p.37
II.2.3.2 Les préparations pour le comptage en scintillation liquide	p.37
II.3 Les unités employées	p.37
II.3.1 Les unités chimiques	p.37
II.3.2 Les unités isotopiques	p.38
II.3.2.1 Les isotopes stables	p.38
II.3.2.2 Les isotopes radioactifs	p.38

III ETUDE HYDROCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES PRECIPITATIONS	p.39
Introduction à l'étude des pluies: caractéristiques de la période d'échantillonnage.	p.41
III.1.1 Introduction	p.42
III.1.2 Résultats sur l'échantillonnage saisonnier	p.42
III.1.2.1 Le domaine de variation des teneurs	p.43
III.1.2.2 La répartition spatiale	p.45
III.1.2.3 Conclusions	p.45
III.1.3 Résultats sur l'échantillonnage saisonnier	p.47
III.1.3.1 Le domaine de variation des teneurs	p.47
III.1.3.2 La relation entre hauteurs journalières de pluie et les teneurs en ions chlorures	p.47
III.1.3.3 Conclusions	p.49
III.2 Etude isotopique des précipitations	p.51
III.2.1 Rappels théoriques	p.51
III.2.1.1 Le fractionnement isotopique	p.51
III.2.1.2 Le comportement isotopique à la condensation	p.52
III.2.1.3 Le comportement isotopique à l'évaporation	p.53
III.2.1.4 Les variations de la composition isotopique des pluies	p.53
III.2.1.4.1 L'effet de la température	p.53
III.2.1.1.4.1.1 Les teneurs annuelles	p.53
III.2.1.1.4.1.2 L'effet saisonnier	p.54
III.2.1.1.4.1.3 L'effet d'altitude	p.54
III.2.1.4.2 L'effet de masse	p.54
III.2.1.4.3 L'effet de continentalité	p.54
III.2.2 La répartition spatiale des teneurs en ^{18}O	p.57
III.2.2.1 Saison cyclonique 1985-1986	p.57
III.2.2.1.1 La carte des teneurs	p.57
III.2.2.1.2 Les gradients d'altitudes	p.59
III.2.2.1.3 Les gradients thermométriques	p.59
III.2.2.2 Saison sèche 1986	p.59
III.2.2.2.1 La carte des teneurs	p.59
III.2.2.2.2 Les gradients d'altitudes	p.59
III.2.2.2.3 Les gradients thermométriques	p.59
III.2.2.3 Saison cyclonique 1986-1987	p.61
III.2.2.3.1 Carte des teneurs	p.61
III.2.2.4 Conclusions sur l'étude spatiale des teneurs	p.61
III.2.3 Les variations saisonnières en ^{18}O	p.63
III.2.3.1 La chronique mensuelle	p.63
III.2.3.2 La quantification de l'effet de masse	p.63
III.2.4 La relation entre ^{18}O et ^2H dans les pluies	p.68
III.3 Conclusions sur l'étude hydrochimique et isotopique des pluies	

IV ETUDE HYDROCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX DES SOLS SOU MIS A EVAPORATION	p.71
introduction	p.73
IV.1 Théorie des mouvements d'eau , d'ions chlorures et de molécules d'eau à ¹⁸O dans le sol.	p.74
IV.1.1 Les mouvements en phase liquide : l'eau, l es molécules à ¹⁸ O et les ions chlorures.	p.74
IV.1.1.1 Les mouvements de l'eau en phase liquide	p.74
IV.1.1.2 Les mouvements des ions et des molécules H ₂ ¹⁸ O en phase liquide	p.74
IV.1.1.2.1 La convection	p.74
IV.1.1.2.2 La diffusion	p.75
IV.1.2 Mouvements en phase vapeur de l'eau et des molécules H ₂ ¹⁸ O	p.75
IV.1.2.1 La convection	p.75
IV.1.2.2 La diffusion de vapeur	
IV.1.2.3 La diffusion des espèces isotopiques de l'eau	p.75
IV.1.3 Conclusion sur les mouvements d'eau, d'ions conservés et H ₂ ¹⁸ O dans le sol.	p.76
IV.2 L'évaporation de nappe	p.78
IV.2.1 Comportement des isotopes stables de l'eau	p.78
IV.2.1.1 Allure théorique des profils isotopiques	p.78
IV.2.1.2 Les équations des profils isotopiques	p.80
IV.2.1.2.1 La région de transfert en phase vapeur	p.80
IV.2.1.2.2 la région de transfert mixte	p.80
IV.2.1.3 Le mode opératoire pour l'estimation de l'évaporation	
IV.2.1.3.1 Cas isotherme	p.82
IV.2.1.3.2 Cas anisotherme	p.82
IV.2.2 Le comportement des ions chlorures	p.83
IV.2.2.1 Introduction	p.83
IV.2.2.2 La modélisation de la concentration de la nappe dans le cas d'une nappe peu profonde	p.84
IV.3 Les autres conditions aux limites	p.86
IV.4. Applications	p.86
IV.4.1 Profils en situations de déficit hydrique	p.88
IV.4.1.1 Profil de S ^t Gilles -Kaufmant	p.88
IV.4.1.1.1 Situation et pédologie	p.88
IV.4.1.1.2 Teneurs volumiques en eau	p.88
IV.4.1.1.3 Teneurs isotopiques	p.88
IV.4.1.1.3.1 Description du profil	p.88
IV.4.1.1.3.2 Modélisation du flux par la méthode isotopique.	p.90
IV.4.1.1.4 Teneurs en chlorures	p.90
IV.4.1.1.4.1 Description	p.90

IV.4.1.1.4.2 Modélisation	p.90
IV.4.1.2 Profil de S ^t Paul	p.92
IV.4.1.2.1 Situation et pédologie	p.92
IV.4.1.2.2 Teneurs volumiques en eau	p.92
IV.4.1.2.3 Teneurs isotopiques	p.92
IV.4.1.2.3.1 Description du profil	p.92
IV.4.1.2.3.2 Modélisation du flux par la méthode isotopique.	p.92
IV.4.1.2.4 Teneurs en chlorures	p.94
IV.4.1.2.4.1 Description	p.94
IV.4.1.2.4.2 Modélisation	p.94
IV.4.1.3 Profil d'Etang Salé	p.96
IV.4.1.3.1 Situation et pédologie	p.96
IV.4.1.3.2 Teneurs volumiques en eau	p.96
IV.4.1.3.3 Teneurs isotopiques	p.96
IV.4.1.3.4 Teneurs en chlorures	p.96
IV.4.1.3.4.1 Description	p.98
IV.4.1.3.4.2 Modélisation	p.98
IV.4.2 Profils en situations d'excédents hydriques	p.100
IV.4.2.1 Introduction	p.100
IV.4.2.2 Profil de Trois Bassins	p.100
IV.4.2.2.1 Situation et pédologie	p.100
IV.4.2.2.2 Teneurs volumiques en eau	p.102
IV.4.2.2.3 Teneurs isotopiques	p.102
IV.4.2.2.4 Modélisation de l'évaporation	p.104
IV.4.2.2.5 L'Infiltration	p.104
IV.4.2.3 Profil de Beaumont	p.106
IV.4.2.3.1 Situation et pédologie	p.106
IV.4.2.3.2 Teneurs volumiques en eau	p.106
IV.4.2.3.3 Teneurs isotopiques	p.106
IV.4.2.3.4 Modélisation de l'évaporation	p.108
IV.4.2.3.5 L'Infiltration	p.108
IV.4.2.4 Profil de La Montagne	p.110
IV.4.2.4.1 Situation et pédologie	p.110
IV.4.2.4.2 Teneurs volumiques en eau	p.110
IV.4.2.4.3 Teneurs isotopiques	p.110
IV.4.2.4.4 Modélisation de l'évaporation	p.110
IV.4.2.4.5 L'infiltration	p.111
IV.4.2.5 Profil de Grand Etang	p.112
IV.4.2.5.1 Situation et pédologie	p.112
IV.4.2.5.2 Teneurs volumiques en eau	p.112
IV.4.2.5.3 Teneurs isotopiques	p.112
IV.4.5.6 Le problème des concentrations en ions chlorures	p.112
IV.5 Synthèse des résultats	p.116
IV.5.1 Les profils en situation d'évaporation de nappe	p.116
IV.5.1 Les profils en situation d'excédent hydrique	p.116

V ETUDE HYDROCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES	p.119
V.1 Etude de l'hydrochimie des eaux éloignées de l'océan	p.121
V.1.1 Description du résultats des analyses	p.122
V.1.2 Etude de la mise en solution du carbone	p.125
V.1.2.1 Application	p.127
V.1.3 L'hydrolyse des minéraux silicatés	p.130
V.1.3.1 Généralités	p.130
V.1.3.2 Les diagrammes de stabilité	p.131
V.1.3.2.1 Principes	p.131
V.1.3.2.2 Application	p.132
V.1.3.3 Recherche des pôles de minéralisation	p.134
V.1.3.3.1 Pôles géochimiques et minéralogiques	p.134
V.1.3.3.2 Critères de reconnaissance géologique des points d'eau	p.136
V.1.3.3.3 Représentation de Piper	p.136
V.1.3.3.3.1 Echantillons de la saison sèche 1986	p.136
V.1.3.3.3.2 Echantillons de la saison humide 1985-1986	p.136
V.1.3.3.4 Détermination des minéraux en cours d'hydrolyse	p.138
V.1.3.3.4.1 Méthode employée	p.138
V.1.3.3.4.2 Application aux minéraux magnésiens	p.138
V.1.3.3.4.3 Application aux minéraux sodiques	p.140
V.1.3.3.4.4 Application aux minéraux calciques et potassiques	p.140
V.1.3.3.5 Approche statistique	p.143
V.1.4 Conclusion sur la chimie des eaux éloignées de l'Océan.	p.144
V.2 Etude hydrochimique des points d'eau à proximité de l'Océan	p.145
V.2.1 Généralités	p.145
V.2.2 Correction de l'influence marine	p.145

VI ETUDE ISOTOPIQUE DES EAUX SOUTERRAINES	p.149
Introduction	p.151
VI.1 Etude des isotopes constitutifs	p.151
VI.1.1 Validité du traçage isotopique	p.151
VI.1.2 Variations temporelles des teneurs en ^{18}O	p.152
VI.1.2.1 Les variations saisonnières	p.152
VI.1.2.2 Les réactions à Clotilda	p.152
VI.1.3 Les altitudes d'alimentation	p.154
VI.1.3.1 Généralités	p.154
VI.1.3.2 Calcul des altitudes	p.154
VI.1.3.3 Applications à la côte ouest	p.156
VI.2 Etude de la minéralisation carbonnée à l'aide du ^{13}C	p.158
VI.2.1 Généralités	p.158
VI.2.2 Effet isotopique de la mise en solution	p.159
VI.2.3 Présence des différents réservoirs à la Réunion	p.160
VI.2.3.1 Le CO_2 biogénique	p.161
VI.2.3.2 Le CO_2 périvolcanique	p.161
VI.2.3.3 les carbonates marins	p.163
VI.2.4 Résultats des analyses des précipités	p.163
VI.2.5 Conclusion	p.164
VI.3 Etude de la minéralisation carbonnée à l'aide du ^{14}C	p.167
VI.3.1 Généralités	p.167
VI.3.2 Etude du couple ^{13}C - ^{14}C	p.168
VI.3.3 Conclusion sur la minéralisation carbonatée	p.170
VI.4 Etude isotopique de la minéralisation sulfatée	p.171
VI.4.1 Généralités	p.171
VI.4.2 Etude des sulfates dissous dans les eaux réunionnaises	p.174
VI.4.3 Corrélations avec les paramètres chimiques	p.176
VI.5 Conclusions sur l'étude isotopique	p.178

VII CONCLUSIONS GENERALES	p.179
VII.1 synthèse des principaux résultats	p.181
VII.1.1 Les pluies	p.181
VII.1.1.1 Chimie	p.181
VII.1.1.2 Isotopes stables	p.181
VII.1.2 Les sols	p.182
VII.1.2.1 L'évaporation de Nappe	p.182
VII.1.2.2 L'évaporation et l'infiltration dans les "hauts"	p.182
VII.1.3 Les eaux souterraines	p.182
VII.1.3.1 La minéralisation	p.182
VII.1.3.2 L'hydrodynamique	p.183
VII.2 Méthodologie et perspectives	p.184
Bibliographie	p.187
Annexes	p.199

LISTE DES FIGURES

Fig.1:	Evolution de la population réunionnaise avec le temps.	p.1
Fig.2:	Situation de la Réunion dans l'Océan Indien.	p.4
Fig.3:	Situation du terrain d'étude :le massif du Piton des Neiges.	p.4
Fig.4:	Relief de l'île.	p.7
Fig.5:	Moyennes des hauteurs des pluies mensuelles centrées réduites pour 5 postes météorologiques.	p.8
Fig.6:	Isohyètes moyennes interannuelles d'après la Météorologie Nationale (en mètres).	p. 8
Fig.7:	Typologie des pluies d'après Robert (1986) de quelques postes pluviométriques par type de pluies (motifs), par mois(secteurs).	p.10
Fig.8:	Diagramme triangulaire de l'importance des types de pluies quelques stations.	p.10
Fig.9:	Ecarts à la moyenne annuelle des températures mensuelles sur quelques postes thermométriques.	p.10
Fig.10:	Diagramme des températures horaires moyennes.	p.10
Fig.11:	Secteurs de gradients altimétriques des températures et répartition spatiale des températures annuelles.	p.10
Fig.12:	Variations saisonnières de la vitesse du vent (moyennes mensuelles interannuelles). (Météorologie Nationale)	p.12
Fig.13:	Directions générales des vents à la Réunion. (Carrère, 1986)	p.12
Fig.14:	Moyennes mensuelles interannuelles des humidités-relatives (en %) pour quelques stations . (Carrère,1986)	p.14
Fig.15:	Rayonnement global et fraction d'insolation journaliers moyens interannuels pour quelques stations météorologiques (d'après Mezino, 1985).	p.14
Fig.16:	Géologie du massif du Piton des Neiges.	p.16
Fig.17:	Coupe radiale des terrains volcaniques du massif du Piton des Neiges, d'après Billard (1974).	p.16
Fig.18:	Effet géochimique de la différenciation magmatique sur les teneurs en silice et en magnésium.D'après les données de Nativel (1978).	p.19
Fig.19:	Pédologie du massif du Piton des Neiges, d'après Rosello (1984).	p.20
Fig.20:	Bassins versants hydrologiques de surface du massif du Piton des Neiges,d'après Robert (1985).	p.23

Fig.21:	Quelques valeurs de débits spécifiques d'étiage et de crue lors de la perturbation cyclonique Hyacinthe en 1980.	p.23
Fig.22:	Débits mensuels de quelques ravines et hauteurs de pluies pendant la même période (cycle 1959-1960). Pluies en mm, débits en $m^3.s^{-1}$.	p.24
Fig.23:	Cinq exemples de bilans hydriques mensuels moyens interannuels des sols.	p.24
Fig.24:	Schéma illustrant les différents types d'aquifères du Piton des Neiges.	p.27
Fig.25:	Carte d'échantillonnage.	p.30
Fig.26:	Chronique des hauteurs d'eau mensuelles tombées à la Montagne avec les périodes d'échantillonnage des pluies, des sols et des eaux souterraines.	p.30
Fig.27:	Ecart à la normale réduit des pluviométries mensuelles sur cinq postes dont on a étudié les teneurs chimiques et isotopiques.	p.41
Fig.28:	Esquisse des isoteneurs en ions Na^+ ($mg.l^{-1}$) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986.	p.44
Fig.29:	Esquisse des isoteneurs en ions Cl^- ($mg.l^{-1}$) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986.	p.44
Fig.30:	Esquisse des isoteneurs en ions Mg^{2+} ($mg.l^{-1}$) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986.	p.44
Fig.31:	Esquisse des isoteneurs en ions K^+ ($mg.l^{-1}$) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986.	p.46
Fig.32:	Esquisse des isoteneurs en ions Ca^{2+} ($mg.l^{-1}$) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986.	p.46
Fig.33:	Diminution des teneurs en Cl^- ($meq.l^{-1}$) dans les pluies en fonction de la distance des côtes est et ouest (saison cyclonique 1985-1986).	p.46
Fig.34:	Relation entre teneurs en ions Cl^- ($mg.l^{-1}$) et hauteurs journalières des pluies (mm) pendant le cycle 1986-1987, à La Montagne.	p.46
Fig.35:	Mise en évidence de "l'effet de masse" sur quelques stations insulaires intertropicales à forte pluviosité (A.I.E.A., 1981).	p.55
Fig.36:	Esquisse des isoteneurs en ^{18}O des pluies de la saison cyclonique 1985-1986 (‰ vs SMOW).	p.56
Fig.37:	Calcul des gradients altitudinaux en ^{18}O lors de la saison cyclonique 1985-1986.	p.56
Fig.38:	Calcul des gradients thermométriques en ^{18}O lors de la saison cyclonique 1985-1986.	p.56
Fig.39:	Esquisse des isoteneurs en ^{18}O des pluies de la saison sèche 1986 (‰ vs SMOW).	p.58

Fig.40:	Calcul du gradient d'altitude en ^{18}O des pluies de la saison sèche 1986.	p.58
Fig.41:	Calcul du gradient thermométrique en ^{18}O des pluies de la saison sèche 1986.	p.60
Fig.42:	Isohyètes des précipitations pendant les trois premiers jours de passage de la perturbation tropicale Clotilda (les hauteurs sont en cm).	p.60
Fig.43:	Image radar de la dépression tropicale Clotilda arrivant sur la Réunion.	p.60
Fig.44:	Trajet du centre de la dépression Clotilda sur l'île de la Réunion le 13 et le 14 février 1987.	p.60
Fig.45:	Esquisse des isoteneurs en ^{18}O des pluies de la saison cyclonique 1986-1987 (Clotilda) (‰ vs SMOW).	p.60
Fig.46:	Chronique mensuelle des teneurs en ^{18}O (en ‰ vs SMOW) des pluies du cycle hydrologique 1986-1987 à la station de La Montagne et hauteurs des pluies mensuelles en mm.	p.62
Fig.47:	Teneurs instantanées en ^{18}O (en ‰ vs SMOW) des pluies lors du passage de la perturbation tropicale, en fonction de la distance de l'oeil à la station.	p.62
Fig.48:	Relation entre le logarithme des hauteurs d'eau mensuelles et les teneurs en ^{18}O des pluies du cycle 1986-1987.	p.64
Fig.49:	Relations entre les différences des indices d'effet de masse et des teneurs en ^{18}O dans les pluies.	p.64
Fig.50:	Relations entre les différences, des indices d'effet de masse et des teneurs en ^{18}O dans les pluies.	p.66
Fig.51:	Relations entre ^{18}O et ^2H (en ‰ vs SMOW) dans les pluies de la saison cyclonique 1985-1986 et de la saison sèche 1985.	p.69
Fig.52:	Relations entre ^{18}O et ^2H (en ‰ vs SMOW) dans les pluies de la saison cyclonique 1985-1986 et de la saison sèche 1985. Dépouillement en droites météoriques.	p.69
Fig.53:	Relations entre ^{18}O et ^2H (en ‰ vs SMOW) dans les pluies du cycle hydrologique 1985-1986. Dépouillement en droite météorique.	p.69
Fig.54:	Profil isotopique théorique de l'eau d'un sol (cas du deutérium), d'après Allison et Barnes (1983).	p.79
Fig.55:	Lithologie du profil S ^t Gilles Kaufmant .	p.89
Fig.56:	Profil des teneurs volumiques en eau du sol de S ^t Gilles Kaufmant.	p.89
Fig.57:	Profil des teneurs en ^{18}O (en ‰ vs SMOW) de l'eau du sol de S ^t Gilles Kaufmant.	p.89
Fig.58:	Profil des teneurs en Cl^- (meq.l ⁻¹) de l'eau du sol de S ^t Gilles Kaufmant.	p.89

Fig.59:	Lithologie du profil S ^t Paul .	p.93
Fig.60:	Profil des teneurs volumiques en eau du sol de S ^t Paul.	p.93
Fig.61:	Profil des teneurs en ¹⁸ O (en ‰vs SMOW) de l'eau du sol de S ^t Paul.	p.93
Fig.62:	Profil des teneurs en Cl ⁻ (meq.l ⁻¹) de l'eau du sol de S ^t Paul.	p.93
Fig.63:	Lithologie du profil d'Etang Salé.	p.97
Fig.64:	Profil des teneurs volumiques en eau du sol d'Etang Salé.	p.97
Fig.65:	Profil des teneurs en ¹⁸ O (en ‰vs SMOW) de l'eau du sol d'Etang Salé.	p.97
Fig.66:	Profil des teneurs en Cl ⁻ (meq.l ⁻¹) de l'eau du sol d'Etang Salé.	p.97
Fig.67:	Lithologie du profil de Trois Bassins.	p.101
Fig.68:	Profil des teneurs volumiques en eau du sol de Trois Bassins.	p.101
Fig.69:	Profil des teneurs en ¹⁸ O (en ‰vs SMOW) de l'eau du sol de Trois Bassins	p.103
Fig.70:	Lithologie du profil de Beaumont.	p.107
Fig.71:	Profil des teneurs volumiques en eau du sol de Beaumont.	p.107
Fig.72:	Profil des teneurs en ¹⁸ O (en ‰vs SMOW) de l'eau du sol de Beaumont.	p.109
Fig.73:	Lithologie du profil de La Montagne.	p.111
Fig.74:	Profil des teneurs volumiques en eau du sol de La Montagne.	p.111
Fig.75:	Profil des teneurs en ¹⁸ O (en ‰vs SMOW) de l'eau du sol de La Montagne.	p.111
Fig.76:	Lithologie du profil de Grand Etang.	p.113
Fig.77:	Profil des teneurs volumiques en eau du sol de Grand Etang.	p.113
Fig.78:	Profil des teneurs en ¹⁸ O (en ‰vs SMOW) de l'eau du sol de Grand Etang.	p.113
Fig.79:	Profil des teneurs en Cl ⁻ (meq.l ⁻¹) de l'eau du sol de Grand Etang.	p.114
Fig.80:	Profil des teneurs en Cl ⁻ (meq.l ⁻¹) de l'eau du sol Trois Bassins.	p.114
Fig.81:	Profil des teneurs en Cl ⁻ (meq.l ⁻¹)de l'eau du sol de Beaumont.	p.114
Fig.82:	Profil des teneurs en Cl ⁻ (meq.l ⁻¹) de l'eau du sol de La Montagne.	p.114
Fig.83:	Teneurs en matière organique de quelques sols d'après Rosello (1984).	p.115
Fig.84:	Illustration de l'effet de la profondeur de la nappe sur le taux d'évaporation à flux constant (réduit par l'ETP).	p.117

Fig.84b:	Comparaison entre la décroissance de l'évaporation donnée par le bilan en ions chlorures et le régime permanent (bilan isotopique).	p.117
Fig.85:	Teneurs en HCO_3^- et salinité Globale (millimol.l ⁻¹) vs Conductivité ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) dans les eaux éloignées de l'océan.	p.126
Fig.86:	Histogramme en deux dimension des logarithmes des pressions équilibrantes de CO_2 (atmosphères) et des indices de saturation en calcite. (eaux éloignées de l'océan).	p.127
Fig.87:	Diagramme d'équilibre des espèces silicatées sodiques.	p.133
Fig.88:	Diagramme d'équilibre des espèces silicatées potassiques.	p.133
Fig.89:	Diagramme d'équilibre des espèces silicatées magnésiennes.	p.133
Fig.90:	Diagramme d'équilibre des espèces silicatées calciques	p.133
Fig.91:	Géochimie de quatre faciès pétrographiques des laves	p.135
Fig.92:	Diagramme triangulaire des teneurs en Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^++K^+ (meq.l ⁻¹) des eaux de la saison sèche (éloignées de l'océan) .	p.137
Fig.93:	Diagramme triangulaire des teneurs en Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^++K^+ (meq.l ⁻¹) des eaux de la saison humide 1985-1986 (éloignées de l'océan) .	p.137
Fig.94:	Report des groupes de points d'eau dans le modèle d'acquisition de minéralisation de l'eau de Wackerman (1981).Minéraux magnésiens.	p.139 -
Fig.95:	Report des groupes de points d'eau dans le modèle d'acquisition de minéralisation de l'eau de Wackerman (1981).Minéraux sodiques.	p.139
Fig.96:	Report des groupes de points d'eau dans le modèle d'acquisition de minéralisation de l'eau de Wackerman(1981).Minéraux calciques.	p.141
Fig.97:	Report des groupes de points d'eau dans le modèle d'acquisition de minéralisation de l'eau de Wackerman (1981).Minéraux potassiques.	p.141
Fig.98:	Résultats de L'analyse en composantes principales effectuée sur les analyses des eaux les moins minéralisées de la saison sèche 1986. Projection des points et des variables sur le plan formé par les deux axes factoriels principaux.	p.142
Fig .99:	Diagramme conductivité <i>versus</i> ($\text{Na}+\text{Cl}$) sur les eaux côtières.	p.147
Fig.100:	Relation entre les "excès" en cations et les "excès" en carbonates et sulfates par rapport à l'influence marine.	p.147
Fig.101:	Relation entre teneurs en oxygène 18 et deutérium dans les eaux souterraines échantillonnées à la fin de la saison sèche.	p.150
Fig.102:	Applications du principe des altitudes d'alimentation aux eaux souterraines de la côte ouest.	p.155
Fig.103:	Principaux indices morphologiques des structures sur la côte ouest, ravines, remparts, falaises actuelles et passées.D'après une photo Landsat (Atlas hydrogéologique, 1986).	p.157

Fig.104:	Schéma illustrant les différentes sources de carbone à la Réunion.	p.162
Fig.105:	Relation entre teneur en carbone inorganique total dissous (millimol.l ⁻¹) et teneur en carbone 13 du CITD (pour mille vs PDB).	p.162
Fig.106:	Relation entre teneur en ¹³ C du CITD (pour mille vs PDB) et altitude d'alimentation estimé d'après les teneurs en ¹⁸ O des eaux.	p.165
Fig.107:	Activité du carbone14 du CO ₂ atmosphérique depuis 1952 dans les deux hémisphères, d'après les données de Nydal et Lovseth (1983) et Vogel (1974). La courbe est extrapolée jusqu'en 1987 (pointillés).	p.165
Fig.108:	Relation entre l'activité en carbone 14 du CITD et la teneur en carbone inorganique dissous.	p.169
Fig.109:	Relation entre activité du carbone 14 (%) et teneur en carbone 13 (pour mille vs SMOW) du CITD.	p.169
Fig.110:	Relation entre les activités ¹⁴ C du CITD (%) et les teneurs en nitrates.	p.169
Fig.111:	Relation entre activité en carbone 14 du CITD et altitude d'alimentation établie d'après les teneurs en ¹⁸ O des eaux.	p.170
Fig.112:	Diagramme illustrant les effets des différents processus affectant les sulfates dissous sur les teneurs en ³⁴ S (pour mille vs CD) et en ¹⁸ O (pour mille vs SMOW) des sulfates d'après Fontes et Michelot (1983).	p.173
Fig.113:	Teneurs en ³⁴ S (pour mille vs CD) versus teneurs en ¹⁸ O (pour mille vs SMOW) des sulfates dissous.	p.175
Fig.114:	Diagramme de teneur en ¹⁸ O du sulfate dissous <i>versus</i> la teneur en ¹⁸ O de l'eau en fonction de la participation variable de l'oxygène de l'eau à l'oxydation des sulfures, d'après Van Everdingen et Krouse (1985).	p.175
Fig.115:	Relation entre [SO ₄ ²⁻]/[Na ⁺](milligrammes) et les teneurs en ³⁴ S (pour mille vs CD) du sulfate aqueux.	p.177
Fig.116:	Diagramme [SO ₄ ²⁻]/[Na ⁺] versus [NO ₃ ⁻] (milligrammes.l ⁻¹) avec les teneurs en ³⁴ S (pour mille vs CD) encadrées.	p.177

LISTE DES TABLEAUX

Tab.1:	Hauteurs et températures mensuelles des pluies des stations de prélèvements pendant la période d'étude.	p.40
Tab.2:	Analyses chimiques partielles des pluies sur l'échantillonnage saisonnier.	p.42
Tab.3:	Chronique des teneurs en ions chlorures dans les pluies journalières au lieu-dit " La Montagne" pendant l'année 1987.	p.48
Tab.4:	Teneurs en isotopes stables des pluies, hauteurs d'eau échantillonnées et températures moyennes pondérées par les hauteurs mensuelles des pluies sur les stations à relevé saisonnier.	p.50
Tab.5:	Quelques valeurs de gradients altitudinaux en isotopes stables dans le monde (<i>in</i> Blavoux, 1978).	p.55
Tab.6:	Chronique mensuelle des teneurs en ^{18}O des précipitations à La Montagne (1986-1987).	p.62
Tab.7:	Recherche de l'effet de masse sur l'échantillonnage saisonnier.	p.67
Tab.8:	Résultats des analyses des eaux éloignées de l'océan pendant la saison sèche 1986 (milligrammes par litre).	p.123
Tab. 9:	Résultats des analyses partielles des eaux éloignées de l'océan pendant la saison humide 1985-1986 (milligrammes par litre).	p.124
Tab.10:	Activités des principales espèces ioniques en solution dans les eaux les moins minéralisées de la saison sèche 1986.	p.128
Tab.11:	Logarithmes des pressions de CO_2 équilibrantes et indices de saturation vis-à-vis de la calcite dans les eaux côtières et dans les eaux éloignées de l'océan au cours de la saison sèche 1986.	p.129
Tab.12:	Résultats des analyses partielles des eaux proches de l'océan pendant la saison sèche 1986 (milligrammes par litre).	p.146
Tab.13:	Teneurs en ^{18}O des eaux souterraines lors des trois campagnes de prélèvements et interprétation des variations en termes de temps de transit et d'altitudes moyennes d'alimentation	p.153
Tab.14:	Résultats des analyses chimiques des eaux souterraines (saison sèche 1987) ayant fait l'objet d'un échantillonnage de leur fraction carbonatée et sulfatée.	p.166
Tab.15:	Résultats des analyses isotopiques des espèces du carbone inorganique en solution.	p.166
Tab.16:	Teneurs en ^{34}S et ^{18}O des sulfates dissous, et en ^{18}O de l'eau.	p. 174

INTRODUCTION

L'île volcanique de la Réunion bénéficie d'un climat tropical humide; néanmoins la côte ouest souffre d'un manque de ressources en eau qui entrave le développement du département.

L'augmentation de la population (Fig.1), le redéploiement industriel, agricole et touristique impliquent une consommation d'eau toujours accrue. De nombreuses études hydrogéologiques (campagnes de géophysique et de forages, mesures hydrologiques) sont conduites dans le but de pourvoir à cette demande. Les problèmes rencontrés lors de ces études sont les suivants :

-L'**infiltration et l'évaporation** qui déterminent la **recharge**, sont souvent appréciées par des méthodes externes au sol, (comme le bilan de Thomwhaite), or, si celles-ci donnent de bonnes estimations globales, elles sont impropres à rendre compte de la **dynamique** de l'eau des sols.

-Les **circulations souterraines** sont souvent le fait de structures **trop petites** pour être mises en évidence par des moyens géophysiques. De plus la **complexité et l'hétérogénéité** du milieu volcanique rendent les **modélisations du comportement des aquifères basaltiques** moins précises.

Notre propos est de préciser les connaissances acquises par **L'étude des éléments dissous et des isotopes du milieu**. En effet, la **comparaison** des teneurs chimiques et isotopiques **des eaux des pluies, des eaux des sols, et des eaux souterraines** permet de mettre en évidence certaines caractéristiques des circulations d'eaux en zone non saturée et saturée.

Nous examinerons donc **les précipitations, le couple infiltration-évaporation** des eaux des sols, et la **circulation souterraine** aux travers des processus qui déterminent leurs teneurs chimiques et isotopiques.

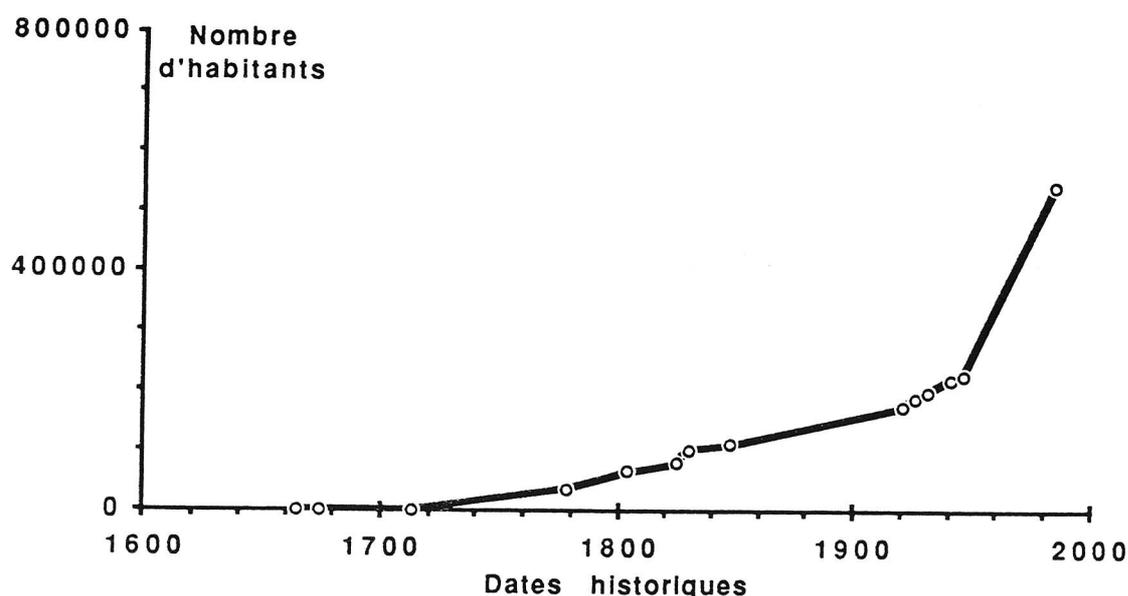


Fig.1: Evolution de la population réunionnaise avec le temps.

Le plan comprend 7 parties :

La première partie traite du **cadre physiographique de l'étude**: après avoir situé la Réunion et donné des éléments d'histoire et de géographie humaine, nous décrivons le terrain d'étude, ses reliefs, son climat, sa géologie et nous ferons le points sur les études hydrologiques et hydrogéologiques antérieures.

La deuxième partie, rend compte **l'échantillonnage et des mesures**. Les choix des mailles spatiales et les pas de temps des différentes campagnes de terrain seront justifiés. Les protocoles analytiques et les unités employées seront décrits.

La troisième partie, concerne **l'étude hydrochimique et isotopique des précipitations**. Il s'agit essentiellement du comportement des ions chlorures et des isotopes stables de l'eau (oxygène 18 et deutérium) lors des phases de condensation.

La quatrième partie, analyse le comportement à l'évaporation des sols réunionnais par **l'étude isotopique et hydrochimique des eaux des sols**. Après avoir rappelé les lois qui régissent les transferts d'eau, d'isotopes, et de solutés dans le sol, nous tenterons une estimation du taux d'évaporation dans les différents sites étudiés.

La cinquième partie, est consacrée à **l'hydrochimie des eaux souterraines** et à l'identification des différentes sources de minéralisation et de leur importance relative.

La sixième partie, est un examen des résultats de **l'étude isotopique des eaux souterraines**. Les isotopes constitutifs de l'eau, les isotopes du carbone et du soufre permettent d'affiner l'étude de l'origine des sels dissous et des circulations.

La septième partie de **conclusion générale** rappelle les résultats et précise l'intérêt d'une démarche d'étude des premiers termes du cycle de l'eau : pluie, solutions du sol et eaux souterraines.

CHAPITRE PREMIER

CADRE DE L'ETUDE

RAPPEL DU SOMMAIRE CHAP. I : CADRE DE L'ETUDE

I.1 Description du terrain d'étude

I.1.1 Situation géographique	p.5
I.1.2 Rappels historiques	
I.1.3 Géographie humaine actuelle	p.5
I.1.4 Le relief	p.6
I.1.5 Le climat	p.9
I.1.5.1 Les pluies	p.9
I.1.5.2 Les températures	p.11
I.1.5.3 Les vents	p.13
I.1.5.4 L'humidité relative	p.15
I.1.5.5 L'insolation	p.15
I.1.6 La géologie du Massif du Piton des Neiges	p.17
I.1.6.1 Les phases géologiques	p.17
I.1.6.1.5 Structure globale	p.18
I.1.6.2 Evolution géochimique et minéralogique des laves	p.18
I.1.6.3 Tectonique	p.19
I.1.6.4 Pédologie	p.21
I.1.7 Hydrologie du Massif du Piton des Neiges	p.22
I.1.7.1 Le régime des principaux cours d'eau du Massif	p.22
I.1.7.2 Le ruissellement et l'infiltration	p.22
I.1.7.3 L'évapotranspiration	p.22
I.1.8 Hydrogéologie	
I.1.8.1 Les types de circulations souterraines	p.25
I.1.8.2 La classification structurale des points d'eau	p.26

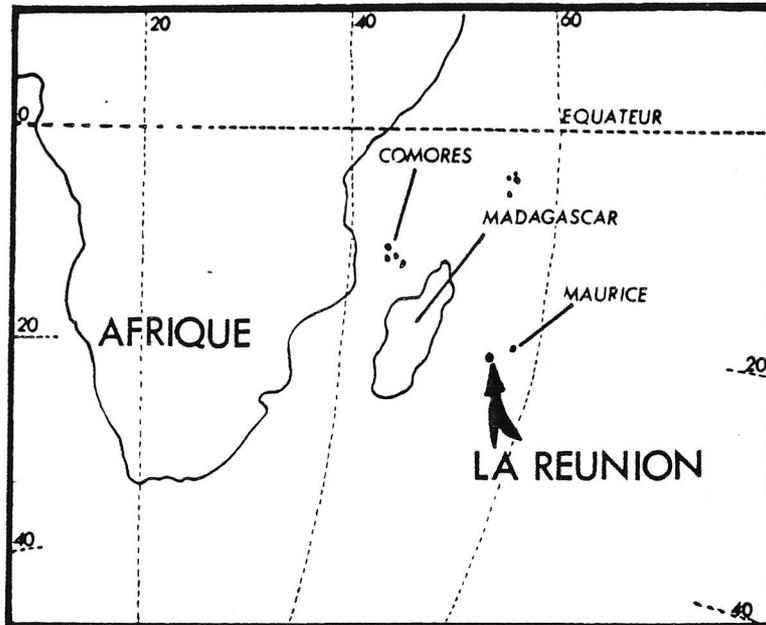


Fig.2: Situation de la Réunion dans l'Océan Indien.

Le massif du Piton des Neiges.

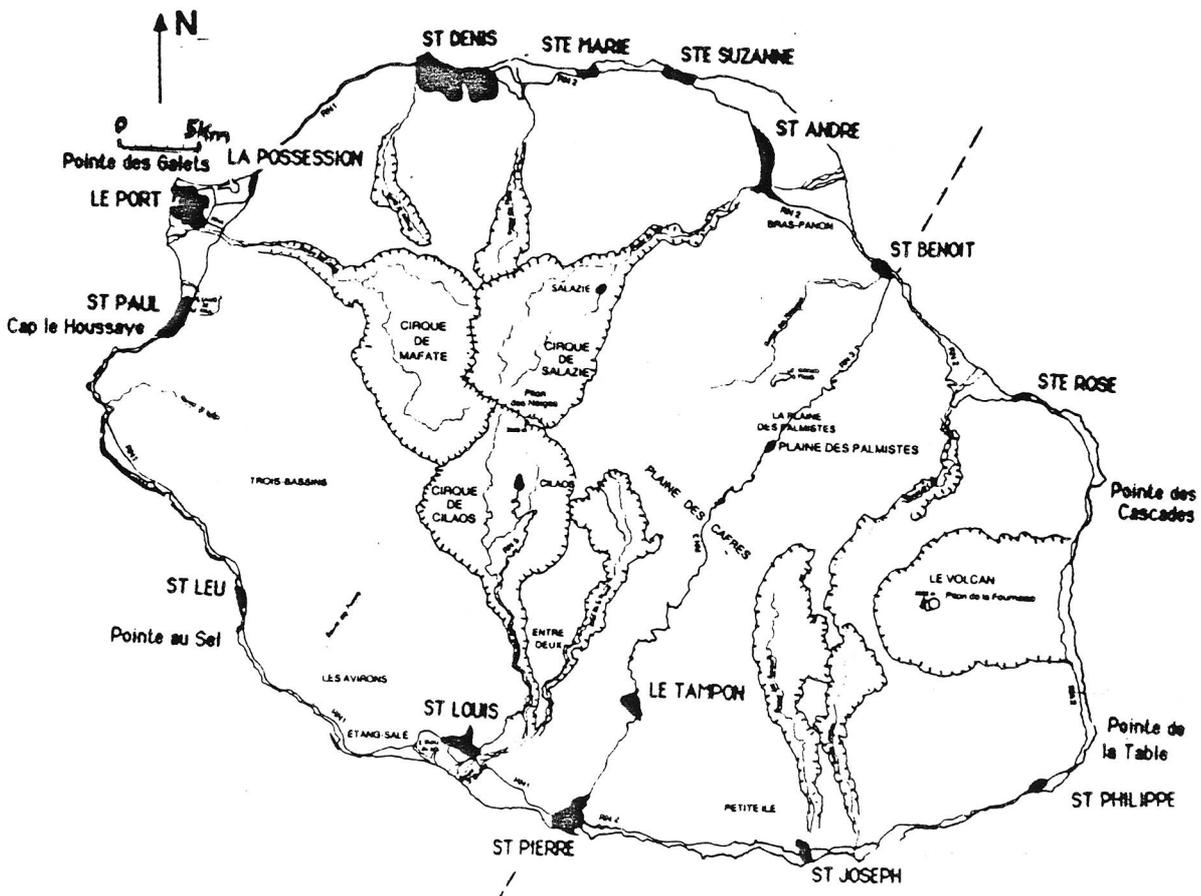


Fig.3: Situation du terrain d'étude : le massif du Piton des Neiges.

I.1 DESCRIPTION DU TERRAIN D'ETUDE.

I.1.1 Situation géographique (Fig.2).

L'île de la Réunion fait partie de l'archipel des Mascareignes dans l'Ouest de l'Océan Indien. Elle est située par 21°7 de latitude sud et 52°32 de longitude est. Ses plus proches voisines sont l'île Maurice à 200 km à l'Est et Madagascar à 800 km à l'Ouest. Le terrain d'étude (Fig.3) est constitué du principal édifice volcanique de l'île : le massif du Piton des Neiges qui couvre les trois quarts N-W de l'île. Ce massif est le résultat d'une activité volcanique passée alors que le massif du Piton de la Fournaise est à l'heure actuelle en cours d'édification.

I.1.2 Rappels historiques (Annexe 1).

La présence humaine à la Réunion date du 16^e siècle. Colonie de peuplement par excellence, l'île le plus souvent sous domination française, lie son destin à celui de la Compagnie des Indes jusqu'à 1767 où l'administration royale prend le relais. Jusqu'en 1848, date de l'abolition de l'esclavage, le peuplement est essentiellement malgache et africain. Par la suite dans les périodes de prospérité, on aura recours à une "immigration" indienne plus ou moins forcée. L'esclavage a fortement marqué l'île avec le "marronage" dont on retrouve la trace dans la nomination des lieux-dits de l'intérieur : "Cilaos" (le lieu dont on ne revient pas (en malgache)).

La départementalisation issue de la libération, puis la régionalisation en 1982 renforcent les liens avec la métropole et donne à l'île les moyens de son développement. La diversité ethnique et raciale témoigne d'une histoire exceptionnelle et donne à la Réunion un cachet humain très particulier.

I.1.3 Géographie humaine actuelle (Fig.3, Annexe 2).

Les plus grandes villes côtières : S^t Denis (110 000 hab.), Le Port (30 000 hab.), S^t Pierre (22 000 hab.), concentrent les activités commerciales, les services et les petites et moyennes entreprises (P.M.E.). Elles regroupent avec leurs communes périphériques environ un quart des habitants de l'île.

Les régions rurales de polyculture mixte sont les plus étendues. On y rencontre les productions agricoles destinées à exportation : la canne à sucre, la vanille, puis en altitude, les plantes à parfum (géranium, vétiver). Des cultures céréalières (maïs), maraîchères et fruitières alimentent le marché local. Enfin, la Réunion bénéficie d'un capital forestier non négligeable sous l'administration de l'Office National des forêts (O.N.F.).

En résumé, on note un fort déséquilibre socio-spatial au détriment des zones d'altitude, S^t Denis exerce sa prédominance démographique, administrative et économique sur l'ensemble de l'île.

1.1.4 Le relief.

L'île présente une forme polylobée d'allongement Nord 110; due à la présence des deux massifs volcaniques de forme conique et dont les pointes forment les deux principaux sommets de l'île : Le Piton des Neiges (3069 m), Le Piton de la Fournaise (2760 m). Si l'on considère la bathymétrie (Fig.4), l'ensemble représente un édifice de 300 km de diamètre reposant sur le plancher océanique dont seuls les trois mille mètres supérieurs forment l'île .

I.1.4.1 Les pentes externes.

Les pentes externes du Massif du Piton des Neiges sont assez douces et régulières (entre 8° et 15°) et viennent généralement rejoindre le niveau marin de façon tangentielle à la faveur des plaines alluviales côtières qui se sont édifiées aux débouchés des vallées importantes. Dans le détail, l'érosion a modelé des vallons, tantôt rectilignes, tantôt "persillés" selon les roches considérées.

I.1.4.2 Les remparts, les cirques et les îlets.

Le centre du massif présente de profondes excavations de formes plus ou moins circulaires; ce sont les "cirques" de Mafate, Cilaos, Salazie. Ces "cirques" sont le résultat d'une érosion violente guidée par des structures tectoniques préexistantes (Chevallier, 1979).

Les "remparts" qui délimitent les "cirques" sont d'impressionnantes falaises, souvent de plus de 1000 m, qui offrent de très belles coupes naturelles des empilements de laves.

Les cirques sont encombrés de produits d'érosion, et entre les vallées subsistent de petits plateaux menacés par l'érosion régressive : ce sont les "îlets" (Ilet à Malheur, Ilet Patience, *etc.*).

I.1.4.3 Les vallées (rivières et ravines).

Les vallées entaillent profondément le cône, par ailleurs régulier, des pentes externes du massif. Les cirques ont chacun un exutoire naturel : pour Cilaos la rivière S^t Etienne, pour Mafate la rivière des Galets et pour Salazie la rivière du Mât.

Certaines vallées se développent hors des cirques. Elles sont parcourues par les rivières, S^t Denis, de l'Est, du Bras de Jeanne et elles sont souvent assimilées à des cirques avortés (Chevallier, 1979). Les "ravines" et les "bras" sont des vallées de moindre importance : ce sont par exemple, la ravine des Avirons , la ravine S^t Gilles .

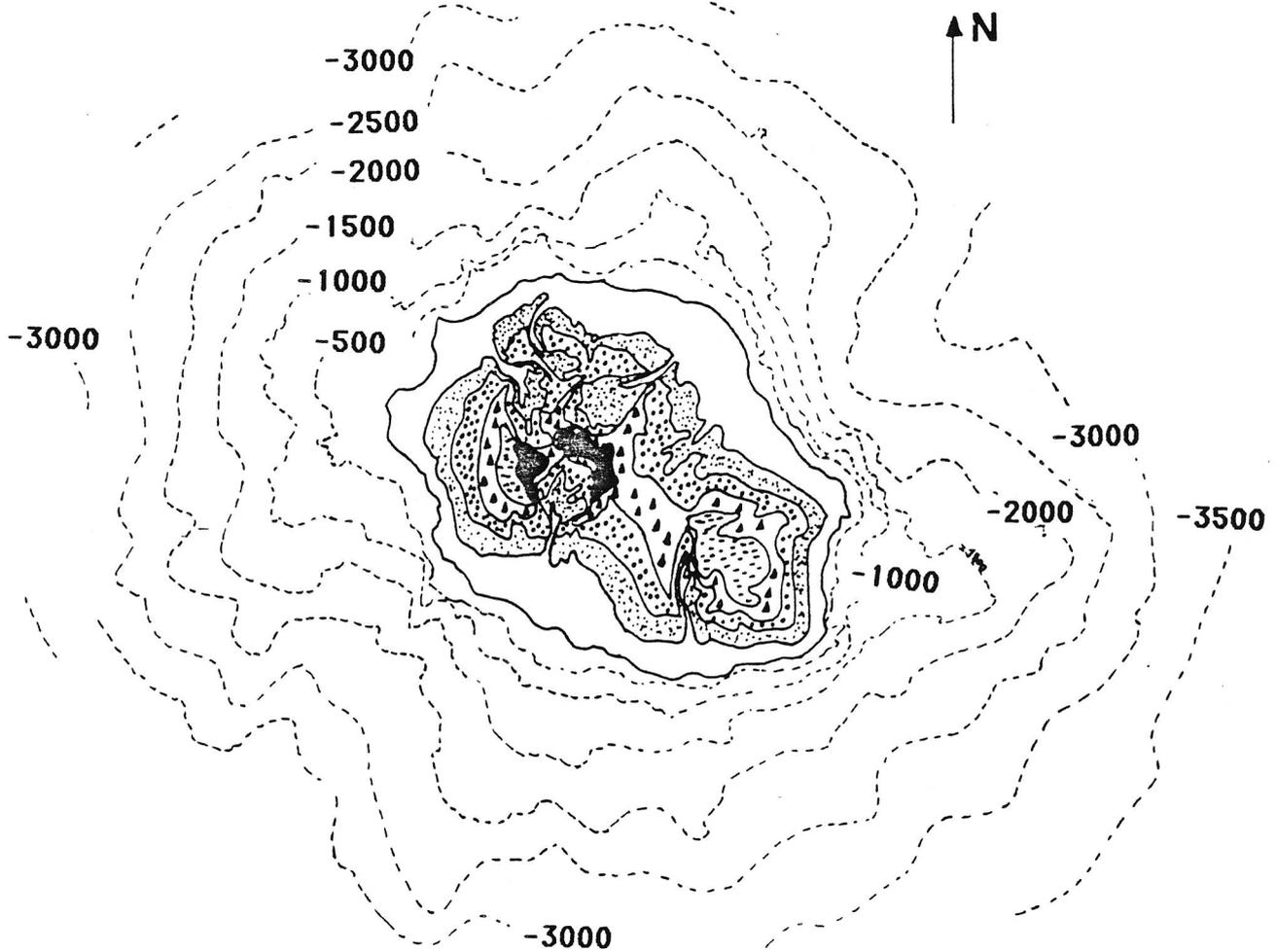


Fig.4: Bathymétrie et relief de l'île.

L'île se présente comme un volcan bouclier posé sur le plancher océanique dont seuls les trois mille derniers mètres émergent, les figurés sur l'île représentent les tranches d'altitudes par 500m.

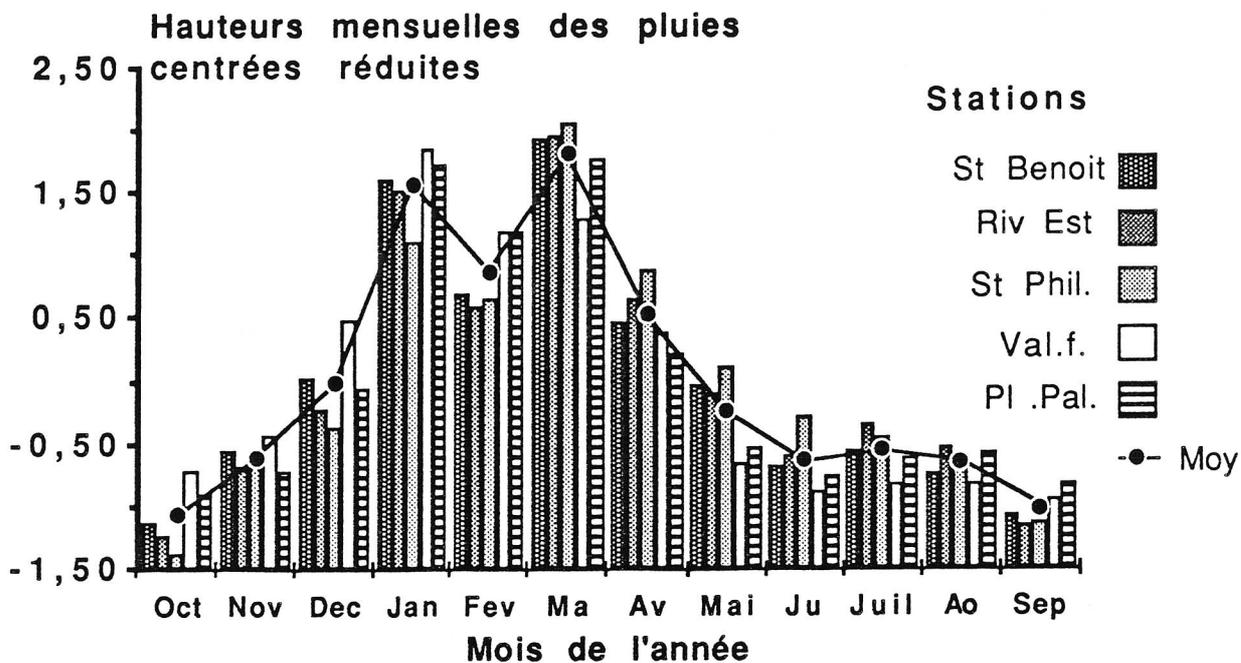


Fig.5: Moyennes des hauteurs des pluies mensuelles centrées réduites pour 5 postes météorologiques (d'après la Météorologie Nationale).

Mise en évidence d'une saison sèche de mai à novembre, d'une saison humide de décembre à avril.

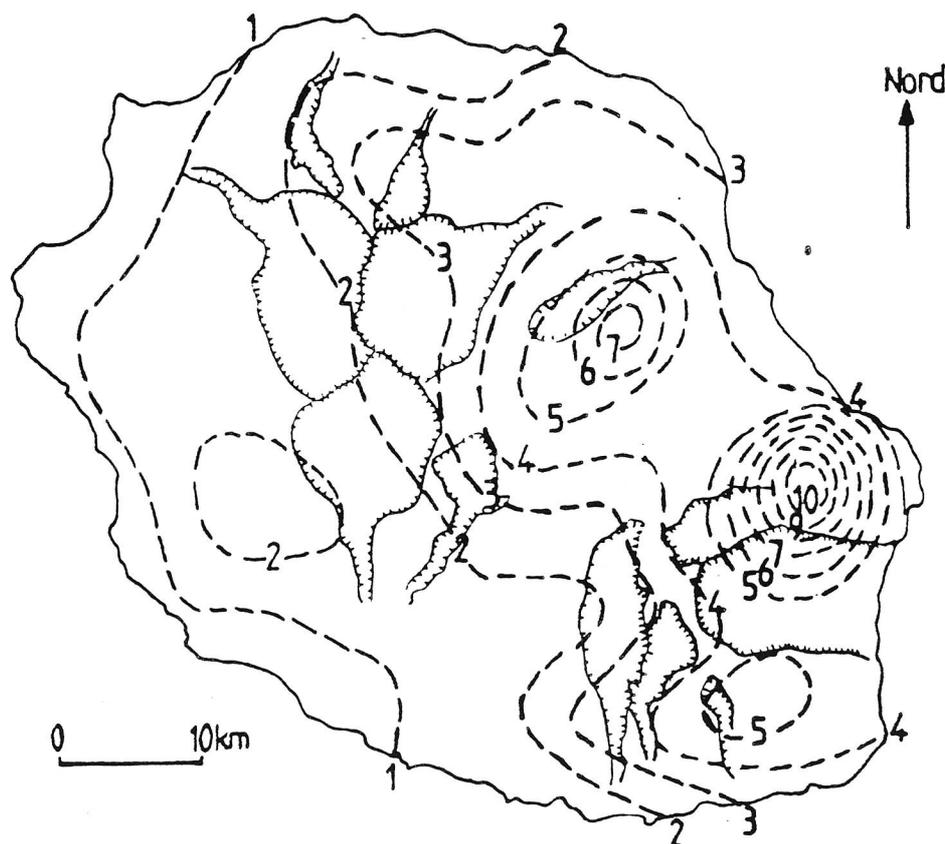


Fig.6: Isohyètes moyennes interannuelles d'après la Météorologie Nationale (en mètres).

Deux régions pluviométriques se distinguent, la côte au vent (est) qui reçoit plus de 2m, la côte sous le vent (ouest) qui reçoit moins de 2m.

I.1.5 Le climat.

Globalement, il peut être défini comme un climat tropical humide à deux saisons. Il n'en reste pas moins que le fort relief et l'influence des vents rendent les conditions climatiques extrêmement variables spatialement.

I.1.5.1 Les pluies.

La répartition temporelle des pluies est régie par l'oscillation en latitude de l'anticyclone de l'Océan Indien et par le passage aléatoire des perturbations tropicales et polaires. Leur répartition spatiale est très variable.

I.1.5.1.1 Répartition temporelle (Fig. 5).

Les pluies ont une répartition mensuelle moyenne assez régulière sur tout le massif avec une saison sèche marquée de juillet à octobre (hiver austral) et une saison pluvieuse de novembre à mai avec deux pics en janvier et mars (été austral). Ce schéma peut être perturbé par le passage de **perturbations tropicales** (de la masse nuageuse simple au cyclone intense), généralement pendant la saison des pluies. Ces phénomènes peuvent engendrer des hauteurs mensuelles supérieures à **cinq fois** la moyenne mensuelle interannuelle. Les pluies journalières atteignent parfois des valeurs supérieures aux totaux mensuels moyens interannuels. Ces pluies exceptionnelles sont redoutées car elles causent d'énormes ravages aussi bien sur la surface cultivée qu'en zone urbaine. En résumé, s'il existe un "signal" saisonnier en hauteur de précipitations il est extrêmement variable d'une année sur l'autre.

I.1.5.1.2 Répartition spatiale (Fig.6).

Du fait des alizés, les hauteurs de pluies annuelles sont très variables en fonction des versants du massif. La côte est, dite "au vent", bénéficie de hauteurs d'eau importantes (entre 2m.an^{-1} et 7m.an^{-1} !). Les maxima observés correspondent à des sites prédisposés aux précipitations orographiques. La côte "sous le vent" reçoit des hauteurs d'eau précipitée, plus modestes, comprises entre $0,5\text{m.an}^{-1}$ et 2m.an^{-1} par an. Sur les deux versants les gradients altimétriques des hauteurs d'eau précipitée, très sectoriels, ne se prêtent pas une estimation mensuelle (Bargeas, 1984; Robert, 1986) mais apparaissent seulement pour les valeurs moyennes.

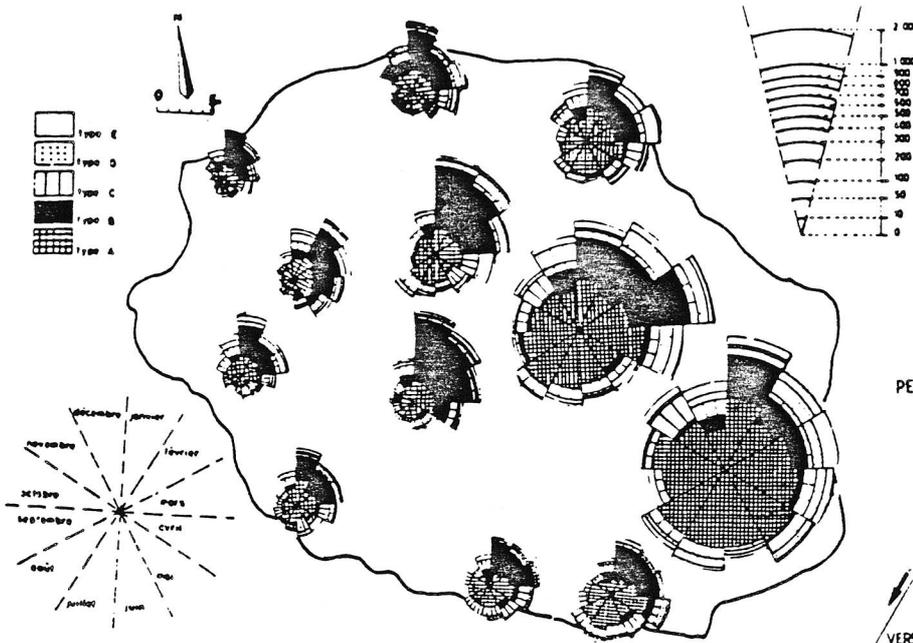


Fig.7: Typologie des pluies de quelques postes pluviométriques par type de pluies (motifs), par mois (secteurs) d'après Robert (1986), simplifié. La figure illustre l'importance des pluies d'alizés sur la côte au vent toute l'année, et de l'importance irrégulière des pluies cycloniques.

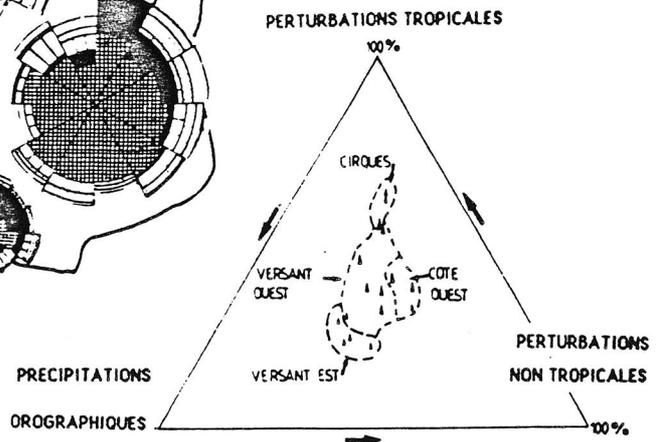


Fig.8: Diagramme triangulaire de l'importance des pluies par type sur quelques stations. La figure illustre la correspondance entre l'importance relative des types de pluies et la situation géographique.

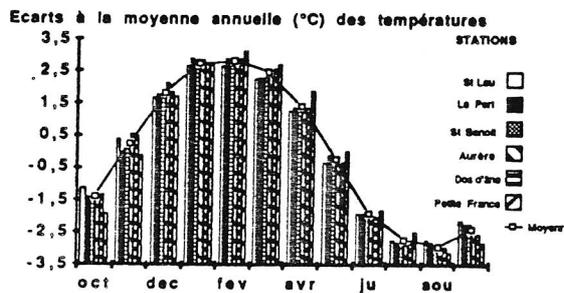


Fig.9: Ecart à la moyenne annuelle des températures mensuelles sur quelques postes thermométriques. (données Météorologie Nationale). Il existe un signal saisonnier d'une amplitude de 5 à 6°C.

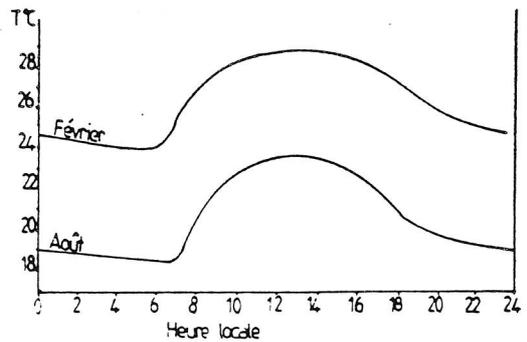


Fig.10: Diagramme des températures horaires moyennes. (Carrère, 1986). le signal thermique journalier moyen est d'une amplitude similaire au signal saisonnier.

I.1.5.1.3 Typologie des pluies.

Les pluies réunionnaises ont des origines très différentes suivant le lieu et la période de l'année (Fig.7) (Robert, 1986).

I.1.5.1.3.1 Les pluies orographiques.

L'alizé est la cause d'une part non négligeable des précipitations. En effet, en "butant" contre les reliefs de l'île, il crée une ascendance forcée de l'atmosphère marine très humide, ce sont les **pluies d'alizés (type A)**. Ce type de pluie est dominant et constant sur la partie est de l'île. En situation de flux général nul, des vents locaux (brises de mer) jouent le même rôle et donnent lieu à des précipitations, mais ce type de pluie (**type D**) est généralement minoritaire sur l'île.

I.1.5.1.3.2 Les pluies de perturbations.

Deux types principaux de perturbations atteignent l'île :

-pendant la saison cyclonique, **les perturbations tropicales (type B)** peuvent affecter toute l'île. Dans les cirques, elles représentent en moyenne plus de 60% des précipitations annuelles;

-pendant toute l'année, **des perturbations d'origine polaire et des perturbations issues des "ondulations d'alizés"** (Robert, 1986) atteignent l'île, constituant un pôle annexe de précipitations (**type C+D**) de moindre importance.

Pour simplifier nous ne retiendrons que trois pôles constitués par **les pluies orographiques (type A+E)**, **les pluies de perturbations tropicales (type B)**, **les pluies de perturbations non tropicales (type C+D)**. Cette simplification permet l'utilisation d'un diagramme triangulaire où sont placées quelques stations étudiées (Fig.8). Les différents groupes géographiques correspondent bien à des types de pluies annuelles similaires.

I.1.5.2 Les températures.

I.1.5.2.1 La répartition temporelle.

A l'échelle saisonnière, les températures moyennes mensuelles déterminent un signal saisonnier (Carrère, 1986) d'une amplitude de 5 à 6°C (Fig.9), remarquablement similaire d'une année sur l'autre, car l'océan représente un "volant" thermique considérable, même "loin" de la côte. A l'échelle de la journée, les températures horaires moyennes présentent un signal classique (Fig.10) avec un minima au petit matin (6-7h) et un maximum à la mi-journée (12-14h), l'amplitude journalière moyenne étant relativement constante (de 4 à 6°C). La similitude entre les amplitudes journalières et les amplitudes saisonnières est un élément précieux pour l'interprétation des données isotopiques des pluies (cf.§III.2).

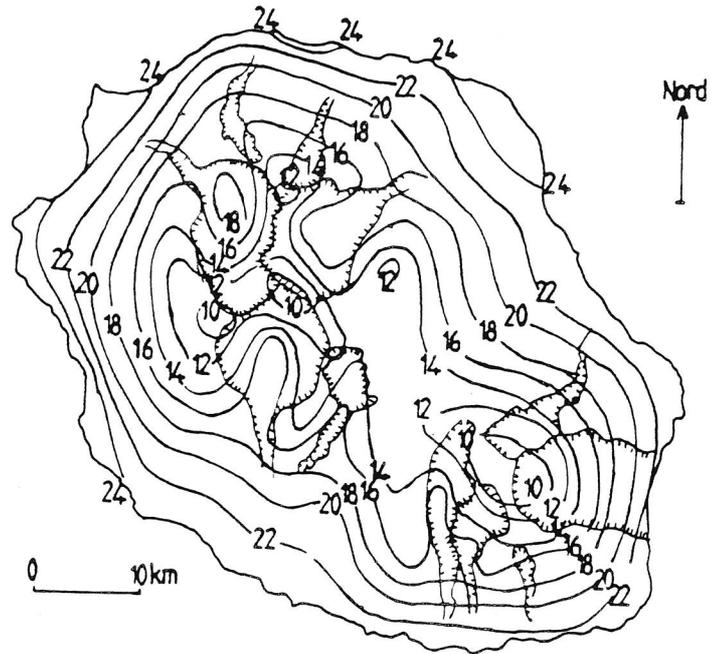
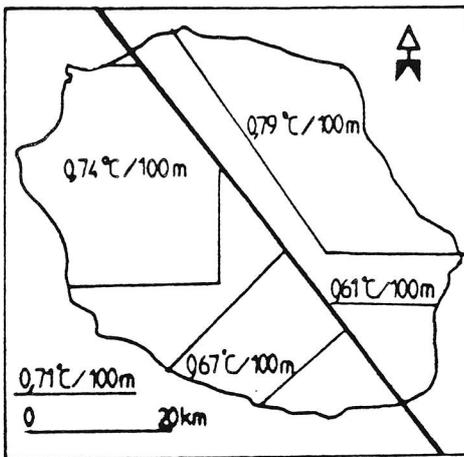


Fig.11: Secteurs de gradients altimétriques des températures (Bargeas, 1984) et répartition spatiale des températures annuelles (Météorologie Nationale)

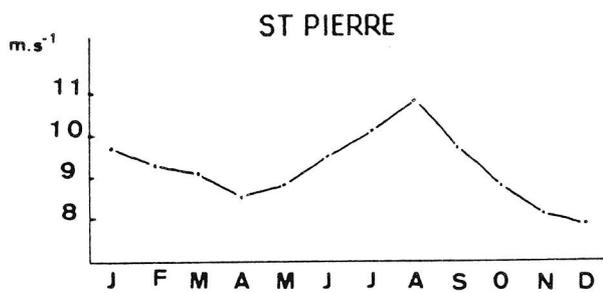


Fig.12: Signal saisonnier du vent (moyennes mensuelles interannuelles)(Carrère, 1986).

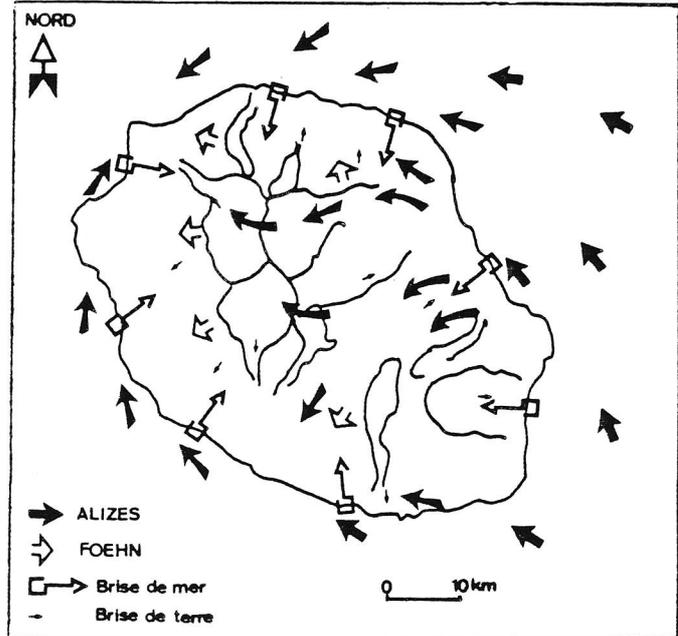


Fig.13: Directions générales des vents à la Réunion. L'alizé subit une déflation et contourne les reliefs de l'île; des vents locaux, en situation de calme général, se produisent sur les versants.

I.1.5.2.2 répartition spatiale des températures.

Les isothermes moyennes annuelles reflètent le fait que la température est principalement régie par le relief. Une différence de 14°C existe entre le niveau marin et les sommets. Il est bon de rappeler que le Piton des Neiges doit son nom à la gelée blanche qui s'installe pendant la nuit à des altitudes supérieures à 2700m au cours de la saison sèche. Les gradients altimétriques des températures sont variables dans l'espace. Bargeas (1983) définit des secteurs différents (Fig.11) où les corrélations mensuelles sont bien établies. Le gradient altimétrique moyen s'établit à la valeur très courante de $-0,7^{\circ}\text{C}.100\text{m}^{-1}$.

I.1.5.3 Les vents.

L'alizé est le vent dominant à la Réunion. Sa présence dans le sens SE-NW est liée : à la proximité nord de l'équateur météorologique (ou zone de convergence intertropicale (Z.C.I.T.)) qui matérialise la limite entre les masses d'air influencées par des forces de Coriolis opposées ; à la présence d'une zone de hautes pressions permanentes (ou Anticyclone de l'Océan Indien (A.O.I.) par 30 à 40° de latitude sud.

I.1.5.3.1 Répartition temporelle des vents.

La répartition mensuelle (Fig.12) met en évidence le caractère saisonnier du vent. Cette régulation est très certainement liée aux déplacements saisonniers :

pendant l'hiver austral (saison sèche , avril à octobre) :

- au Nord , la Z.C.I.T. s'éloigne de la Réunion (25 à 30° de latitude nord),
- au Sud l'A.O.I. se rapproche (30° de latitude sud);

l'île se trouve donc sous l'influence d'un flux de Sud-Est frais et assez fort : l'alizé *sensu stricto* ;

pendant l'été austral (saison des pluies, novembre à mars) :

- au Nord , la Z.C.I.T se rapproche de la Réunion (entre 5 et 10° de latitude sud)
- au Sud , l'A.O.I. descend jusqu'au 36° sud;

L'île reçoit alors deux flux, un "alizé" d'Est plus faible et un courant Nord-Est plus chaud et humide lié à la Z.I.C.T., porteur des perturbations et des cyclones. A ces phénomènes généraux s'ajoutent des vents locaux qui sont les brises de mer et de terre, causées par les différences de températures entre l'océan et l'île. En effet la répartition horaire moyenne du vent montre que les maxima de vents se situent généralement vers 13 heures (Carrère,1986).

I.1.5.3.2 La répartition spatiale des vents.

L'alizé présente une **déflation** très nette sur les reliefs de l'île, le vent étant guidé par les deux édifices volcaniques (Fig.13). Cette déflation se retrouve dans le tracé des isohyètes interannuels (Fig.6) qui peuvent être considérés, sur la partie ouest de l'île, comme des lignes de directions perpendiculaires à celles des vents.

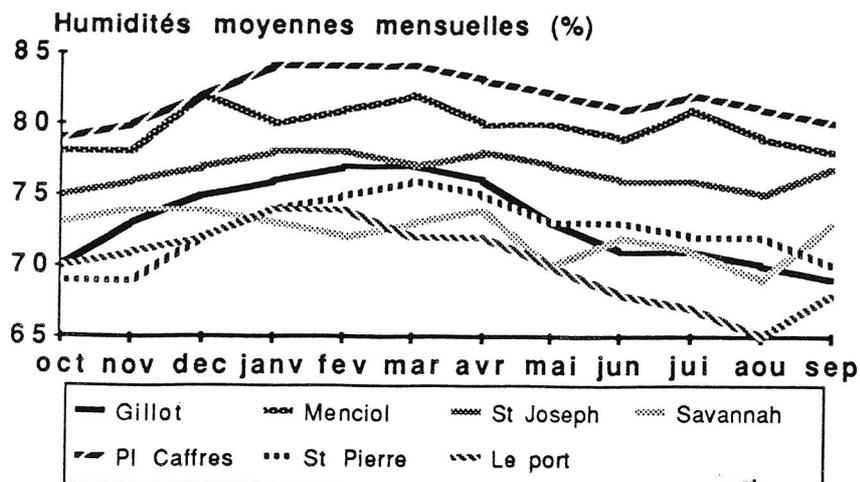


Fig.14: Moyennes mensuelles interannuelles des humidités relatives (en %) pour quelques stations. Le signal saisonnier ne se ressent fortement que sur les stations de la côte ouest. Ailleurs (stations de Menciol et de la plaine des Cafres), il n'est que très faiblement ressenti.

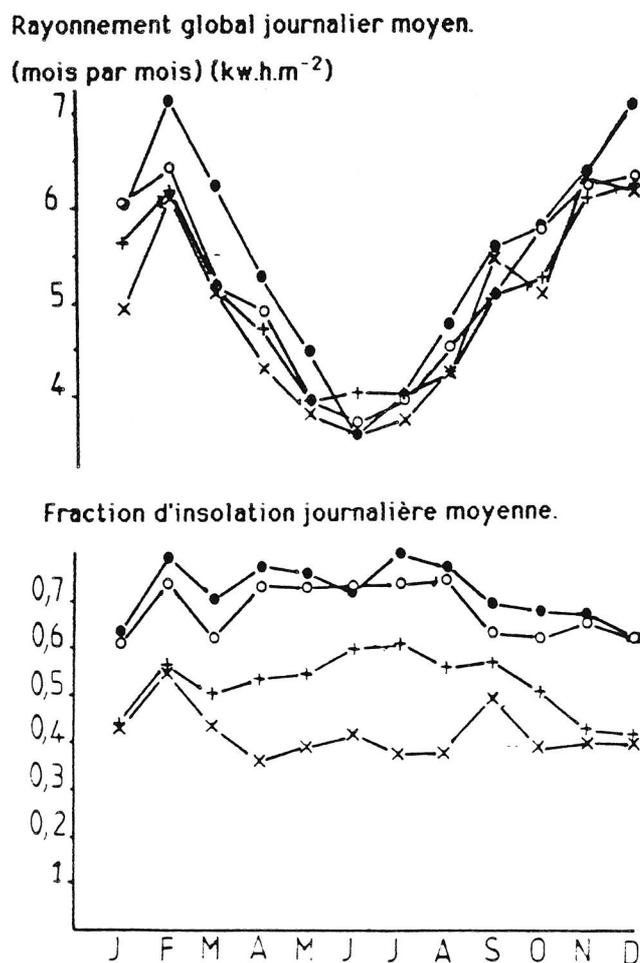


Fig.15: Rayonnement global et fraction d'insolation journaliers moyens interannuels pour quelques stations météorologiques (d'après Mezino, 1985).

La figure met en avant que malgré une couverture nuageuse relativement constante, l'énergie reçue par le sol est très variable.

I.1.5.4 L'humidité relative.

L'humidité relative excède toujours 50% en moyenne minimale mensuelle ce qui est normal au regard de l'omniprésence de l'atmosphère marine. En moyenne annuelle les valeurs sont comprises entre 70% au Port et 82% à la station de la Plaine des Cafres. La variation saisonnière (Fig.14) semble plus marquée pour les stations à faible humidité relative moyenne (Le Port, Savannah, S^t Pierre, Gillot), et atteint 9% au Port.

I.1.5.5 L'insolation.

L'énergie reçue par la surface du sol dépend de deux phénomènes :

- les variations astronomiques saisonnières (le soleil est plus "fort" pendant l'été austral)

: il s'agit d'un phénomène général,

- la fréquence du couvert nuageux (le temps est moins couvert pendant l'hiver austral) qui réfléchit une partie de l'énergie : il s'agit d'un phénomène local.

La résultante de ces deux phénomènes est le rayonnement global mesuré par les pyranomètres de la Météorologie Nationale.

Le rayonnement global est l'énergie reçue par une surface au sol, il comprend, le rayonnement direct, le rayonnement diffus, il peut s'exprimer en $W.m^{-2}.h^{-1}$

I.1.5.5.1 Variations temporelles du rayonnement global.

L'étude à l'échelle mensuelle de 4 stations montre (Mezino,1985) que le facteur "variations astronomiques" de la puissance du rayonnement solaire reçu est déterminant sur l'énergie reçue (Fig.15). Ceci s'explique par la relative constance de la moyenne mensuelle de la fraction d'insolation quotidienne pour chaque poste au cours de l'année (Fig.15). Pendant l'hiver austral, il pleut moins mais le ciel est presque aussi couvert sur les hauteurs.

La fraction d'insolation quotidienne (sans dimension) est le rapport entre la durée d'ensoleillement observée et la durée d'ensoleillement potentielle.

I.1.5.5.2 Variations spatiales du rayonnement global au sol.

Les causes sont à rechercher dans les variations de la fraction d'insolation :

- le rayonnement global est fort dans les zones de basse altitude à l'Ouest qui sont protégées par le relief de l'île des perturbations provenant de l'Est,

- le rayonnement est faible dans les zones de moyenne altitude, où se produisent les pluies orographiques,

- le rayonnement est assez fort dans les zones de haute altitude que les nuages n'atteignent généralement qu'en cours d'après-midi.

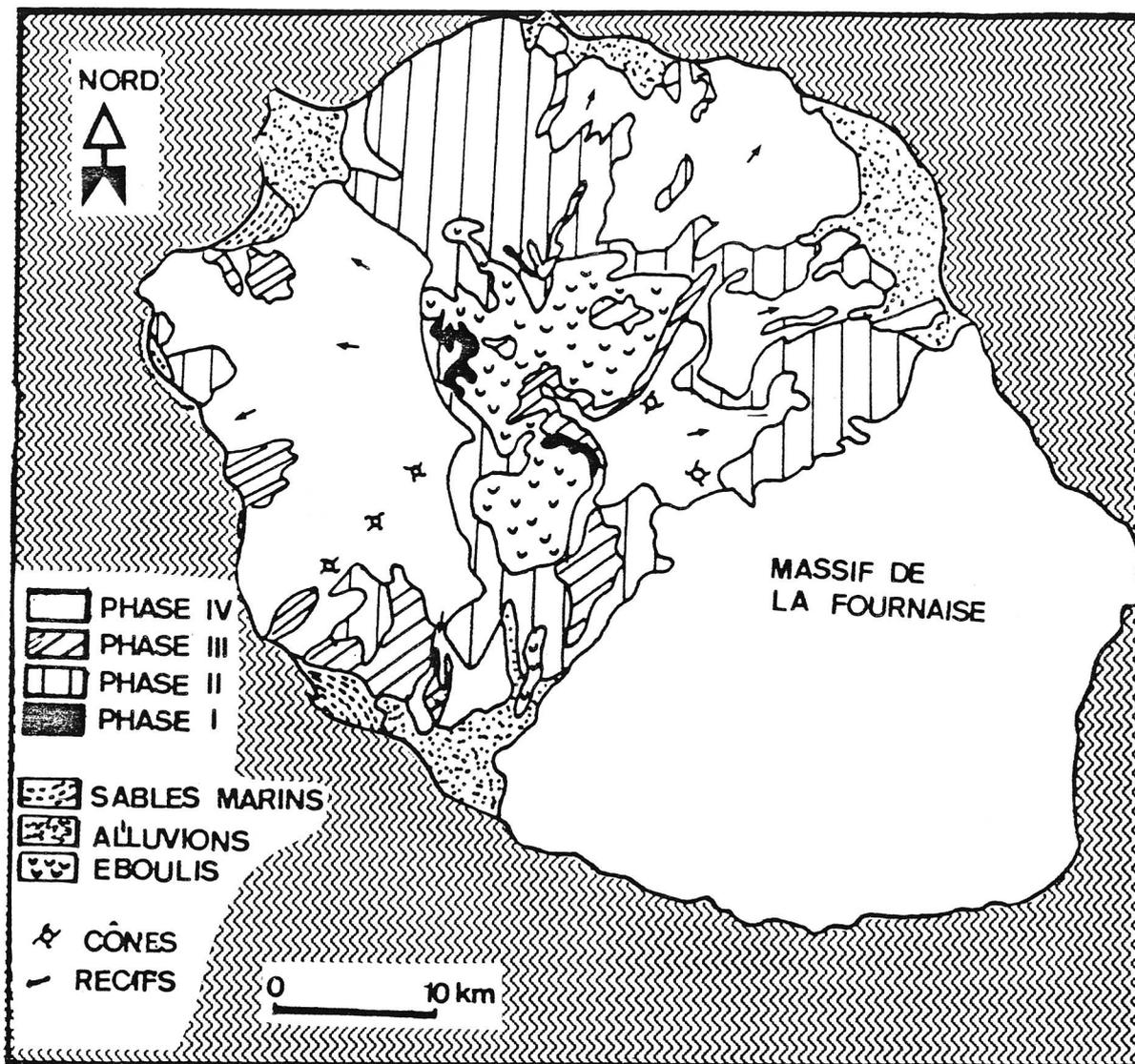


Fig.16: Géologie du massif du Piton des Neiges. (Billard, 1974; Atlas hydrogéologique, 1986)

La phase IV est la plus répandue à l'affleurement bien qu'elle ne représente qu'une fraction négligeable du matériel volcanique émis.

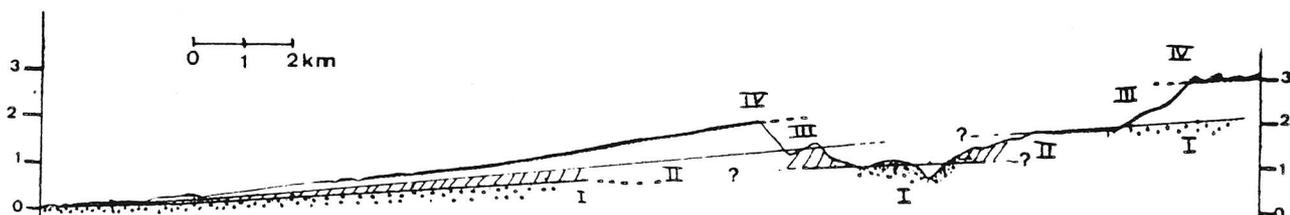


Fig.17: Coupe radiale des terrains volcaniques du massif du Piton des Neiges, d'après Billard (1974).

Les épanchements volcaniques présentent, en grand, une structure simple de biseaux élargis vers le haut.

I.1.6 La géologie du massif du Piton des Neiges.

Le massif du Piton des Neiges (Fig.16) est principalement constitué de produits volcaniques, laves, scories, pyroclastiques et de produits détritiques dérivés. La seule exception est la formation d'une bande récifale réduite sur la côte ouest (Billard,1974).

I.1.6.1 Les phases géologiques.

L'histoire géologique du Massif est découpée en phases d'activités. Les phases sont séparées par des périodes de repos du volcan qui se matérialisent sur le terrain par la présence dans les coupes de niveaux importants de paléosols.

I.1.6.1.1 La phase I.

Le volcan sous marin qui a donné naissance à l'île s'est édifié sur le plancher océanique pendant une durée inconnue. Le premier Piton des Neiges a émergé il y a quelques millions d'années, et l'on considère parfois les agglomérats et les brèches basaltiques de fond de cirques comme les seuls témoins de l'épisode sous-marin, soulevés ultérieurement. Ce sont les formations de la phase I.

I.1.6.1.2 La phase II.

Après l'émergence, le volcan établit l'essentiel de la structure du massif avec des empilements de plusieurs centaines de mètres de coulées et scories **non différenciées**. C'est la phase II qui commence avant 2,1 Ma et qui se termine il y a environ 0,43 Ma par une période calme remarquable de 0,08 Ma (Nativel,1978). L'érosion va modeler profondément les structures et une intense activité hydrothermale produit un front de zéolitisation qui affecte le bas des terrains de la phase II. L'activité n'est pas toujours centrale puisqu'il semble qu'une activité explosive se soit manifestée dans le secteur de Cap la Houssaye, à l'extrémité occidentale de l'île.

I.1.6.1.3 La phase III.

Après cette pause, l'activité reprend pour une période d'environ 0,1 Ma pendant lesquels s'édifie un appareil central important (environ 800 m de hauteur) qui est matérialisé par les masses du Gros Morne et du Piton des Neiges. Les laves émises sont des **laves différenciées** qui nappent les paléoreliefs. La fin de la phase est marquée par une activité explosive qui se retrouve surtout dans le cirque de Salazie.

I.1.6.1.4 La phase IV.

Entre 0,23 Ma et 0,07 Ma, des coulées de matériel généralement aphyrique empruntent les paléovallées et nappent les versants à partir d'un point d'émission vraisemblablement central. Ces

terrains, négligeables par leurs volumes, couvrent de très grandes surfaces. La phase présente vers sa fin un caractère explosif et Rocher (1988) mentionne une datation ^{14}C à 22000 ans B.P. sous un niveau de cendres du plateau de Bélouve .

I.1.6.1.5 Structure globale.

Les successions des différentes phases émissives du Piton des Neiges lui confèrent à **grande échelle** une structure assez simple.

Les terrains se présentent en coupe radiale (Fig.17) comme des biseaux élargis vers le haut, mais cette structure est compliquée par des événements locaux :

-les points d'émission n'ont pas toujours été centraux et de nombreux cônes adventifs ont fonctionné au cours des différentes phases éruptives comme en témoignent :

- la fissure éruptive de S^t Gilles, les petits cônes adventifs dans les hauts d'Etang Salé,

- les nombreux dykes, preuves de la décentralisation des points d'émissions;

- le jeu combiné de la tectonique distensive et de l'érosion responsables des paléoreliefs qui font que l'ensemble des phases n'est pas toujours, loin de là , représenté dans les coupes,

-la tectonique a décalé les niveaux volcaniques créant des accidents souvent scellés par les émissions ultérieures.

I.1.6.2 Evolution géochimique et minéralogique des laves.

Les laves du Piton des Neiges se subdivisent en deux groupes sur la base de critères d'évolution magmatique. Les laves **non différenciées** sont les laves de la "période de croissance" (Nativel, 1978) du volcan. Par la suite, pendant la période de "déclin", le magma évolue et il apparaît des laves **différenciées**. Cette évolution du chimisme des émissions au court des temps géologiques est une donnée essentielle pour comprendre le chimisme des eaux souterraines.

I.1.6.2.1 Les laves non différenciées.

Les laves non différenciées appartiennent en majorité aux phases I et II ; ce sont généralement des océanites et des basaltes à olivines.

L'olivine, qui représente parfois plus de 50% du volume de la lave, est souvent magnésienne à 80% et s'altère fréquemment en iddingsite (Nativel ,1978).

Le chimisme des laves non différenciées est **monotone** : il s'agit de l'épanchement d'un magma intermédiaire entre les magmas tholéiitique et alcalin , on le dit **transitionnel**.

I.1.6.2.2 Les laves différenciées.

Les laves différenciées appartiennent généralement aux phases III et IV .

Ces phases marquent le début d'un processus de cristallisation fractionnée au sein du magma. II

apparaît alors des basaltes porphyriques à plagioclases connus localement sous le nom de " roches pintades" que certains auteurs considèrent comme un véritable repère stratigraphique de la transition phase II -phase III (Billard, 1974). Les plagioclases sont des bytownites. Ces basaltes passent insensiblement aux hawaïtes (avec des phénocristaux de plagioclases un peu moins calciques).

Les mugéarites sont les laves différenciées les plus abondantes, le feldspath varie du labrador à l'anorthose. La différenciation atteint son maximum avec l'émission de trachytes et commendites, cependant ces roches très acides se rencontrent plus fréquemment dans les sills, les dykes et les cendres que dans les épanchements laviques classiques, si l'on excepte le plateau de Bélouze (Billard, 1974).

Le chimisme reflète fidèlement cette différenciation magmatique selon un schéma classique d'enrichissement en silice, sodium, potassium et un appauvrissement en magnésium, fer et calcium pour les termes les plus différenciés (Nativel, 1978) (Fig.18).

I.1.6.3 La tectonique.

La tectonique du Piton des Neiges est une tectonique distensive.

L'étude de cette tectonique se base essentiellement sur deux catégories de témoins :

- les dykes sont témoins par leur orientation, du champ de contraintes présent dans l'encaissant au moment de leur mise en place,
- les remparts des cirques, sont parfois considérés comme les traces d'anciens effondrements.

L'étude des structures entreprise par Chevallier (1979) dégage plusieurs directions N110, N45, N30 pour les dykes et attribue à certains remparts une origine tectonique, il s'agirait d'anciennes caldéras (caldéras I, caldéras II, etc ...).

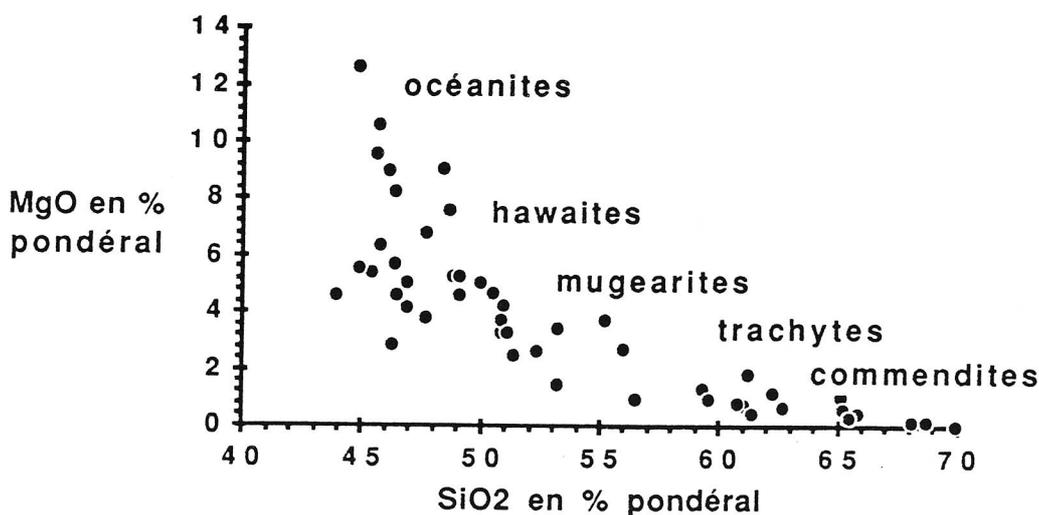


Fig.18: Effet géochimique de la différenciation magmatique sur les teneurs en silice et en magnésium. D'après les données figurant dans Nativel (1978).

La différenciation géochimique des laves fournit un canevas essentiel pour comprendre la minéralisation des eaux.

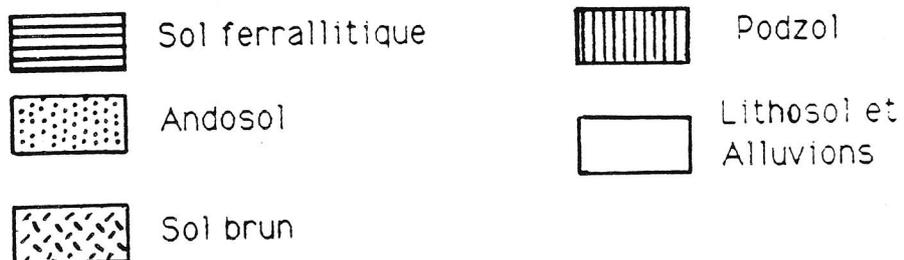
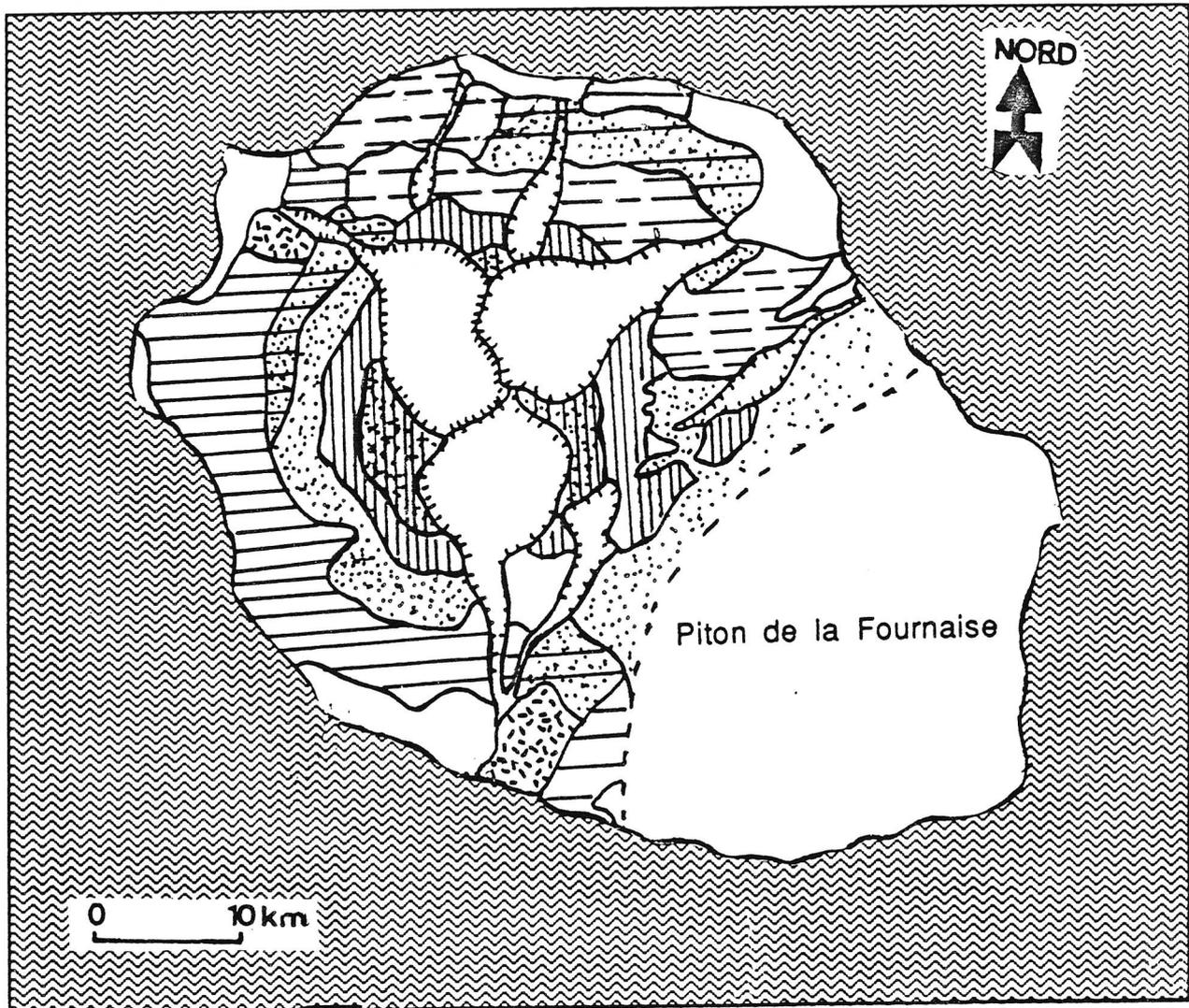


Fig.19: Pédologie du massif du Piton des Neiges, d'après Rosello (1984).
La pédologie montre une stratification altitudinale très nette qui diffère légèrement d'un versant à l'autre en fonction des apports pluviométriques.

I.1.6.4 La pédologie.

L'étude des sols sera évoquée sous ses divers aspects dans différents chapitres de ce travail. L'aspect "propriétés hydriques" sera détaillé dans le chapitre IV et l'aspect "processus de l'altération et bilan géochimique" sera détaillé dans le chapitre V. Nous donnerons donc ici, ce qui se réfère au cadre de l'étude.

"L'étagement des sols en fonction de l'altitude" (Rosello, 1984) est particulièrement net sur le massif du Piton des Neiges et s'explique par les forts contrastes pluviométriques et thermométriques. Les séquences observées sont classiques des pays volcaniques tropicaux à fort relief. On observe de haut en bas des podzols, des andosols, des sols ferrallitiques (Fig. 19).

I.1.6.4.1 Les andosols.

Ils prédominent à la Réunion : ce sont des sols caractérisés par "l'abondance dans leur fraction minérale de produits amorphes silico-alumino-ferrugineux associés à des teneurs variables mais souvent élevées en matière organique" (Sieffermann, 1973). Les andosols sont souvent considérés comme des sols "jeunes" car l'état amorphe est instable. A la Réunion, "la grande majorité des andosols s'est développée sur cendres, soit totalement, soit en partie" (Rosello, 1984). Or les derniers dépôts cendreux ont eu lieu il y a moins de 0,03 Ma (Bachelery, 1981). Leurs caractères remarquables sont (Rosello, 1984) :

- des teneurs en eau très élevées, entre 110% et 220% par rapport à la matière sèche, qui rendent compte d'une structure peu commune, des densités apparentes sèches très faibles entre 0,5 et 0,3 ,
- des pH entre 4 et 6 .

I.1.6.4.2 Les sols ferrallitiques.

Ils se rencontrent à des altitudes inférieures à 600m et sont caractérisés dans leur fraction minérale par la prédominance des argiles par rapport aux allophanes, et par une proportion élevée d'oxydes et d'hydroxydes de fer, d'aluminium, de titane. Ils passent insensiblement aux andosols lorsque la proportion en allophane augmente; on parle alors de sols ferrallitiques andiques. Ils peuvent se subdiviser en fonction de leur degré de saturation en bases (Sieffermann, 1973). Leurs principales caractéristiques sont (Rosello, 1984) :

- des teneurs en eau de 40 à 50% , des densités apparentes sèches entre 0,8 et 1,0 ,
- des pH entre 4 et 6.

I.1.6.4.3. Les podzols.

Ces sols qui se rencontrent dans les zones d'altitude sont caractérisés par une accumulation biologique de silice et un lessivage de l'aluminium et du fer. Ils sont très acides surtout dans les horizons superficiels où le pH atteint 3,7.

I.1.7 Hydrologie du Massif du Piton des Neiges.

I.1.7.1 Le régime des principaux cours d'eau du Massif.

Les bassins versants topographiques présentent des formes variées : longs et étroits sur le flanc ouest de l'édifice, ils sont plus compacts sur le flanc est (Fig.20).

Bien que les crues soient des phénomènes redoutés à la Réunion, les données disponibles sont assez rares. Quelques mesures et estimations concernent les crues engendrées par la dépression tropicale Hyacinthe en 1980 (Fig.21). Les débits spécifiques atteignent alors plusieurs $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Plusieurs auteurs (Touchebeuf De Lussigny, 1960; Bargeas, 1984; Robert, 1986) soulignent l'importance de l'état du sol dans " la montée en crue". Les débits d'étiages, importants de part de leur intérêt économique évident, renseignent sur la contribution des réserves souterraines à l'écoulement de surface. Les débits caractéristiques mensuels des principaux torrents en 1960 font apparaître plusieurs régimes d'assèchement. Par exemple, la Rivière S^{te} Suzanne, le Grand Bras, la Rivière des Roches ont des débits peu "soutenus", très liés à l'apport des pluies. Par contre La Rivière du Mat, la Ravine des Marsouins, le Bras de la Plaine, la Rivière S^t Denis ont des débits très régulés par un apport souterrain important. Cette distinction se retrouve évidemment dans les variations de débits en fonction du temps (Fig.22) où le Bras de Cilaos, le Bras de la plaine, la Rivière des Galets et la Ravine des Marsouins montrent un amortissement considérable du signal "pluie".

I.1.7.2 Le ruissellement et l'infiltration.

Les analyses de ruissellement sur des parcelles WISCHMEIER (Bougère & Gopal,1985) montrent une infiltration de 80% des pluies sur les andosols sur cendres de Beaumont-les-Hauts (S^{te} Marie). Les bilans hydrologiques annuels, calculés aux stations de jaugeage (Robert,1986) des exutoires de bassins versants montrent, pour la plupart, une proportion de pluie écoulee largement supérieure à 30%. Cette contradiction apparente ne doit pas surprendre dans la mesure où **les ravines drainent aussi les sols**, ce qui rend la distinction entre **ruissellement et infiltration** très aléatoire.

I.1.7.3 L'évapotranspiration.

L'évaporation physique mesurée par le système Piche montre une répartition spatiale assez simple, guidée par l'altitude et l'exposition au vent. Les valeurs mensuelles accusent une faible tendance saisonnière. L'évapotranspiration potentielle mensuelle moyenne (E.T.P.) (calculé selon la formule de Turc par la Météorologie Nationale) montre une variation saisonnière plus marquée. La comparaison avec les valeurs mensuelles des pluies (Fig.23) fait apparaître qu' **octobre est le mois de l'année pendant lequel E.T.P. est supérieure aux pluies sur toutes les stations**. Ce "déficit" à l'échelle mensuelle est bien entendu beaucoup plus important de haut en bas et d'Est en Ouest (Carrère, 1986).

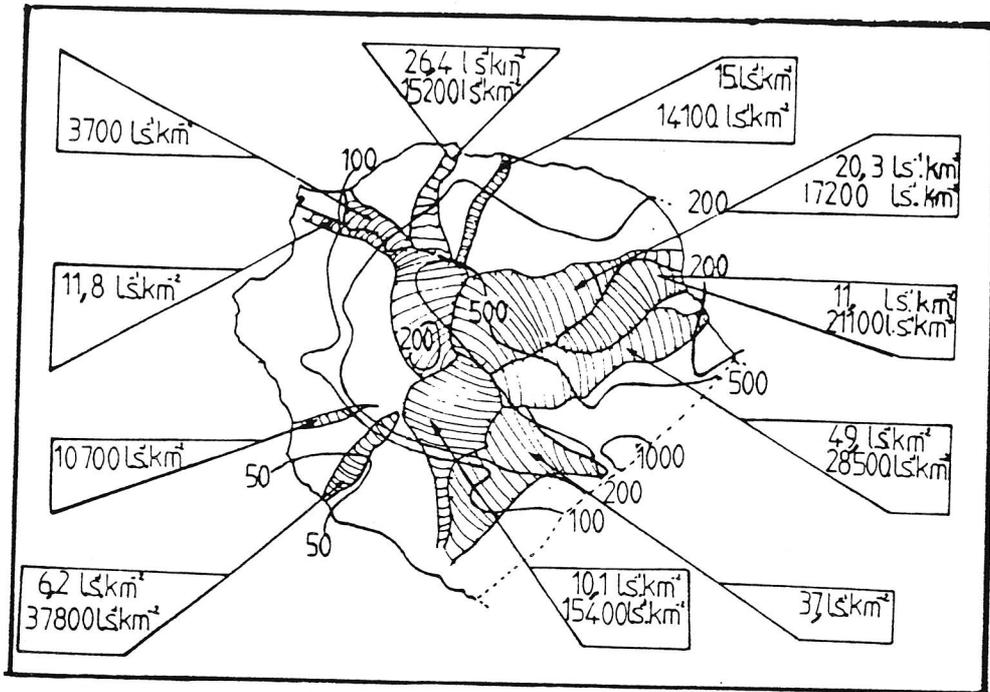


Fig.21: Quelques valeurs de débits spécifiques d'étiage et de crue lors de la perturbation cyclonique Hyacinthe en 1980.

Les faibles valeurs d'étiage sont significatives d'une participation faible des réserves souterraines à l'écoulement de surface.

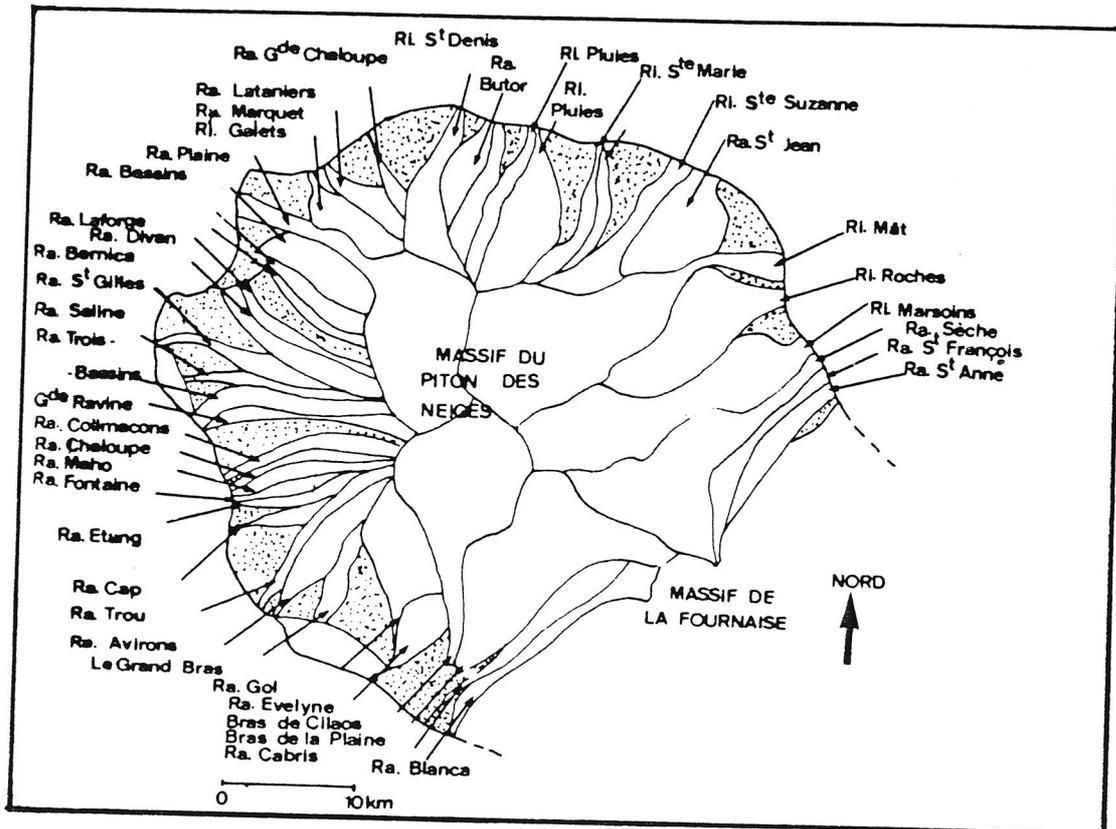


Fig.20: Bassins versants hydrologiques de surface du massif du Piton des Neiges, d'après Robert (1985).

Les bassins versants présentent des formes très diverses, le plus souvent extrêmement allongées, ce qui est caractéristique des îles volcaniques tropicales comme Tahiti (Ferry, 1988).

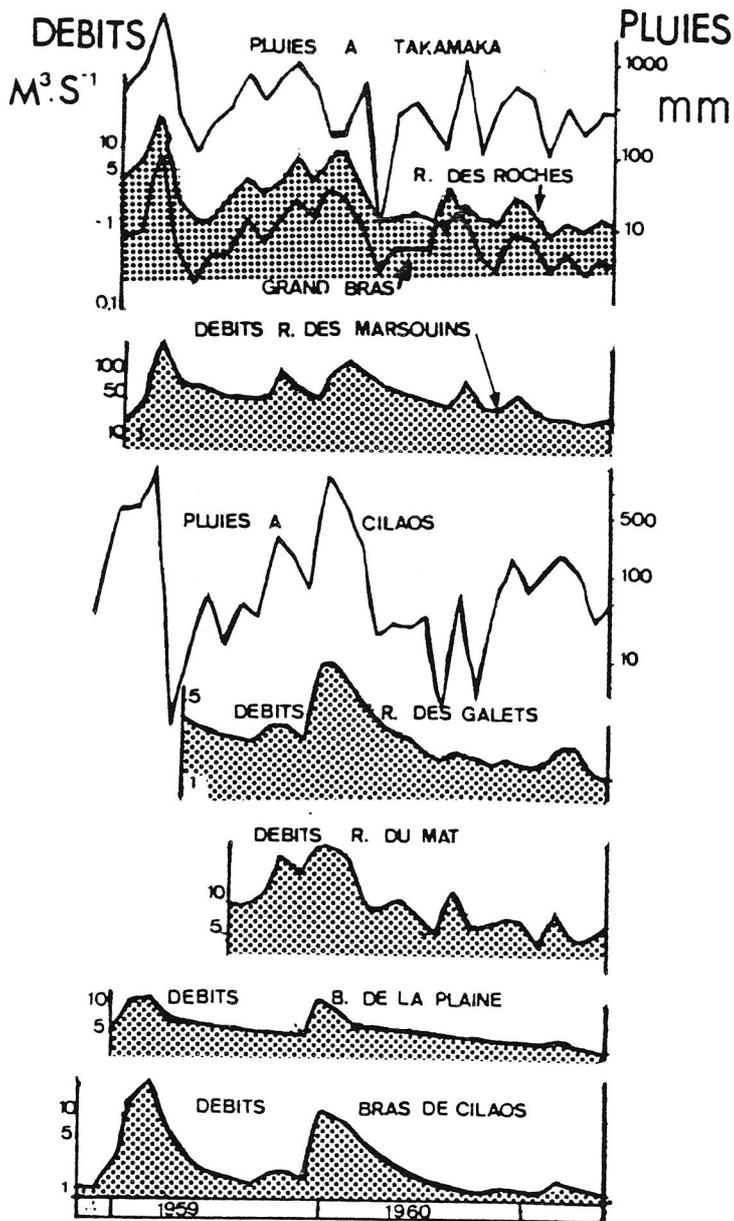


Fig.22: Présentation de débits mensuels de quelques ravines à comparer avec les pluies pendant la même période (cycle 1959-1960). Pluies en mm, débits en $m^3.s^{-1}$.

Les chroniques de débits présentent des allures plus ou moins accidentées, preuves d'une participation plus ou moins grande des réserves souterraines.

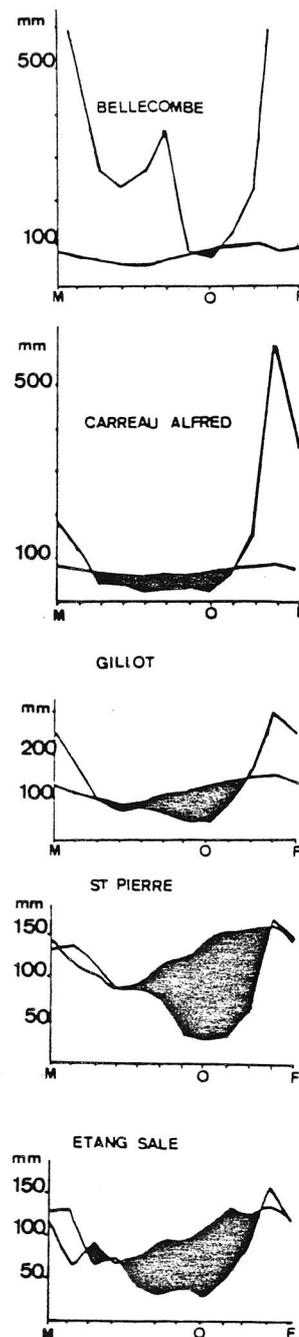


Fig.23: Cinq exemples de bilans hydriques de surface mensuels moyens interannuels.

Le déficit hydrique est plus grand sur la côte ouest, mais en altitude il devient négligeable. Sur le versant est, le bilan hydrique n'est déficitaire qu'en octobre.

I.1.8 Hydrogéologie.

I.1.8.1 Les types d'écoulements souterrains.

On distingue couramment deux types d'écoulements souterrains sur le massif du Piton des Neiges : les écoulements au sein des produits volcaniques et les écoulements dans les dépôts détritiques. L'eau circule essentiellement dans la **porosité de fracture** au sein des laves, dans la **porosité matricielle** dans les dépôts détritiques.

Dans les laves l'hétérogénéité spatiale de la perméabilité, produit des cheminements qui sont souvent le fait de **petites structures** à l'échelle de la coulée, voire à l'échelle de la fracture. Les lieux des circulations souterraines échappent donc à la plupart des investigations géophysiques et géologiques.

Dans les puits, les galeries, et au niveau des sources des remparts on observe, à l'**échelle métrique et décimétrique**, que les écoulements se produisent particulièrement :

-dans les **drains** remarquables, comme : les fractures génétiques des coulées (coulées prismées), les *kinkers*, les paléoalluvions, les tunnels de laves,

-au contact avec des **imperméables relatifs** comme : les niveaux de cendres, les paléosols, les lahars.

A l'**échelle hectométrique et kilométrique**, le rôle hydrogéologique des dykes est difficile à apprécier, en effet ils constituent alternativement des "barrières" étanches et des drains en fonction de leur fracturation souvent liée à leur mise en place. Par contre, **deux grandes structures** dont on connaît mal la géométrie, peuvent être considérées comme des limites étanches, ce sont :

-le biseau salé en bord de l'océan,

-le front géothermique de zéolitisation interne.

La combinaison des structures et des gradients hydrauliques produit une orientation des circulations d'eau, comme montré dans le tableau suivant :

Structures géologiques	Extension (mètres)	rôle relatif hydrogéol.	Orientations des structures	Directions d'écoulements (issues des orientations et des gradients hydrauliques)
Fractures	0,01 ⇔ 1	drain	Très diverses	?
Kinkers	10 ⇔ 1000	drain	Paléopentes	Paléopentes
Paléoalluvions	10 ⇔ 1000	drain	Paléopentes	Paléopentes
Tunnels de laves	10 ⇔ 1000	drain	Paléopentes	Paléopentes
Niveau de cendres	10 ⇔ générale	imperméable	Paléopentes	Paléopentes
Paléosols	10 ⇔ générale	imperméable	Paléopentes	Paléopentes
Lahars	10 ⇔ 1000	imperméable	Paléopentes	Paléopentes
Dykes	10 ⇔ 1000	?	Généralement verticales	?
Biseau sale	1000 ⇔ ?	imperméable	Pentée vers l'intérieur	sub horizontal
Front géotherm.	générale ?	imperméable ?	Pentée vers l'extérieur ?	penne douce ?
Failles	1000	?	Généralement verticales	?

Du fait de l'hétérogénéité spatiale, les paramètres hydrodynamiques sont mal appréciés et sont très variables d'un ouvrage à l'autre (Atlas Hydrogéologique de la Réunion, 1986; Join, à paraître).

En résumé nous dirons que les écoulements souterrains du Massif du Piton des Neiges sont guidés par des **structures limitées** difficilement détectables par la géophysique et les sondages. Les circulations sont *a priori* rapides et seule la présence favorable de structures "piégeantes" permet la constitution de réserves appréciables en eau souterraine.

En milieux détritiques et alluvionnaires, les écoulements sont mieux connus car la perméabilité est distribuée d'une manière plus homogène et les structures sont plus grandes : ce sont les nappes alluviales, deltaïques et d'arrière récif.

Les deux milieux interfèrent souvent, les coulées scellant parfois des terrains détritiques. Dans ce cas les laves peuvent :

- constituer des drains (laves fracturées),
- constituer des imperméables relatifs (paléosols recuits).

I.1.8.2 Classification structurale des aquifères et des points d'eau.

Un schéma général des circulations peut néanmoins être proposé (Fig.24) avec une classification structurale des aquifères. On distingue deux catégories d'aquifères.

-les aquifères de "base" sont issus de la rencontre de circulations d'eau avec le biseau salé marin, éventuellement au sein des formations détritiques côtières. Le biseau salé ne constitue certainement pas une limite simple puisque les intercalations eau douce-eau salée ont été reconnues par forage et que des émergences marines d'eau douce sous le niveau marin ont été mises en évidence par télédétection infra-rouge (Clerc,1988). L'aquifère de "base" que l'on dit "généralisé" présente un **gradient hydraulique très faible** sur la côte ouest, de l'ordre du millième (Join *et al*, 1986). Malheureusement, l'on ne connaît pas son extension vers l'intérieur des terres.

-Les aquifères "perchés" (Castagny, 1984)

Le massif du piton des Neiges est souvent considéré comme un "château d'eau" (Robert, 1986). En effet, de nombreuses sources pérennes en altitudes attestent de la présence de réserves d'eau. Ces sources sont issues de nappes à **forts gradients hydrauliques**, au moins égaux aux paléopentes.

Les sources des remparts sont issues d'un écoulement vertical dominant probablement guidé par des structures tectoniques; elles jaillissent souvent à la faveur d'un niveau imperméable. Leur bassin versant est nécessairement réduit sauf dans le cas de paléopentes favorables (Plateau de Bélouve).

Les sources des pentes externes du massif du Piton des Neiges sont le fruit d'un écoulement selon les paléopentes, elles s'écoulent à la faveur de pentes topographiques plus accusées que la paléopente qui guide les écoulements (Le Tévelave- S¹ Paul).

Les sources de fond de cirque attestent de la présence de petits aquifères au sein des éboulis reposant sur les terrains zéolitisés. A noter aussi, la présence de sources thermo-minérales (entre 30 et 40°C) à la faveur de grands accidents.

Sur les points d'eau de la côte, il est souvent difficile de distinguer, ce qui provient d'un écoulement selon les paléopentes, de ce qui semble provenir de "l'aquifère de base". En effet le domaine côtier voit le mélange des écoulements "rapides et superficiels" à la faveur des paléopentes et de l'écoulement plus "lent et profond" de l'aquifère de base.

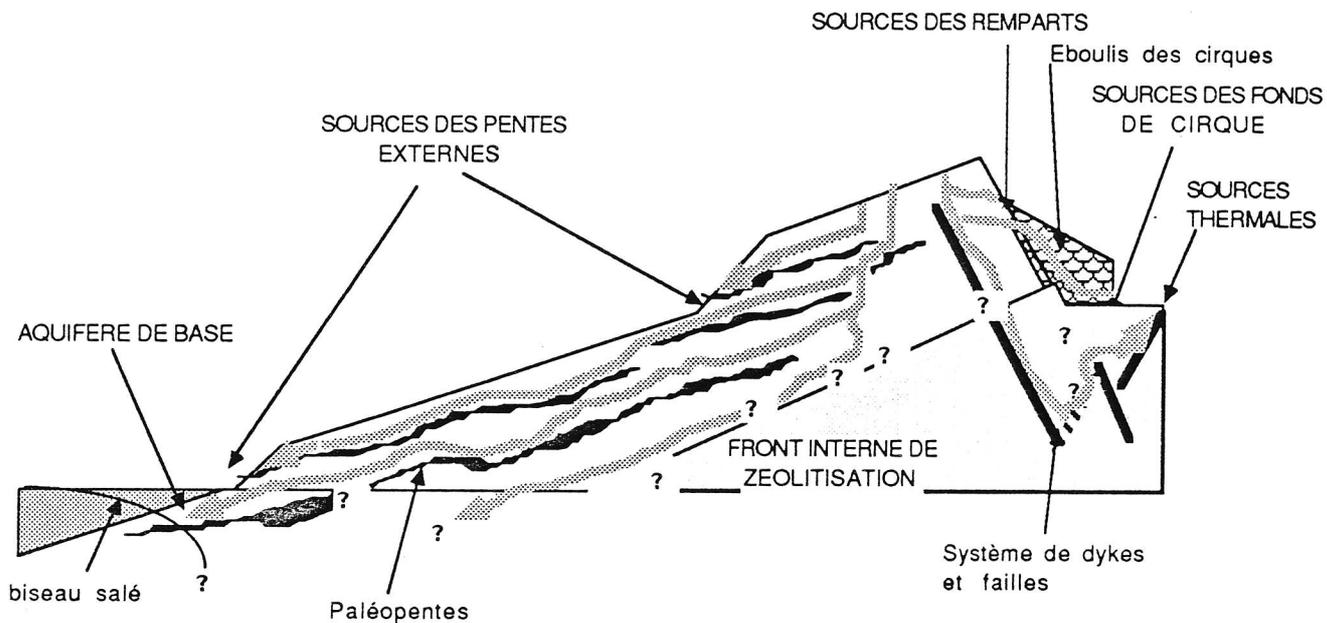


Fig.24: Schéma illustrant les différents types d'aquifères du Piton des Neiges.
Sur la côte ouest, l'exploitation principale se fait sur les aquifères côtiers, avec des menaces d'invasion marine.

En conclusion, les recherches en eau potable et d'irrigation sont rendues difficiles par la complexité d'un milieu, très hétérogène, mal connu, dans la plupart des sites. La majorité des circulations échappent donc au prélèvements et s'écoulent en mer comme le montrent les panaches observés sur les photographies aériennes dans l'infra-rouges.

CHAPITRE DEUXIEME
ECHANTILLONNAGES ET MESURES

RAPPEL DU SOMMAIRE DU CHAP.II : ECHANTILLONNAGE ET MESURES

II.1 L'échantillonnage	
II.1.1 Le prélèvement des eaux de pluies	p.31
II.1.1.1 Les prélèvements saisonniers des eaux de pluies	
II.1.1.1.1 Les dispositifs de prélèvements	p.31
II.1.1.1.2 Les sites choisis	p.31
II.1.1.1.3 Les prélèvements	p.32
II.1.1.2 Les prélèvements journaliers	p.32
II.1.2 Les prélèvements de l'eau des sols	p.32
II.1.2.1 Les prélèvements des sols	p.32
II.1.2.2 L'extraction de l'eau des sols	p.33
II.1.2.3 L'extraction des sels par lixiviation	p.33
II.1.2.4 L'estimation des teneurs volumiques	p.33
II.1.3 Le prélèvement des eaux souterraines	p.34
II.2 Les mesures effectuées et les méthodes employées	p.35
II.2.1 Les mesures de terrain	p.35
II.2.2 Les mesures des concentrations chimiques	p.35
II.2.3 Les mesures isotopiques	p.36
II.2.3.1 Les préparations pour la mesure au spectromètre de masse	p.37
II.2.3.2 Les préparations pour le comptage en scintillation liquide	p.37
II.3 Les unités employées	p.37
II.3.1 Les unités chimiques	p.37
II.3.2 Les unités isotopiques	p.38
II.3.2.1 Les isotopes stables	p.38
II.3.2.2 Les isotopes radioactifs	p.38

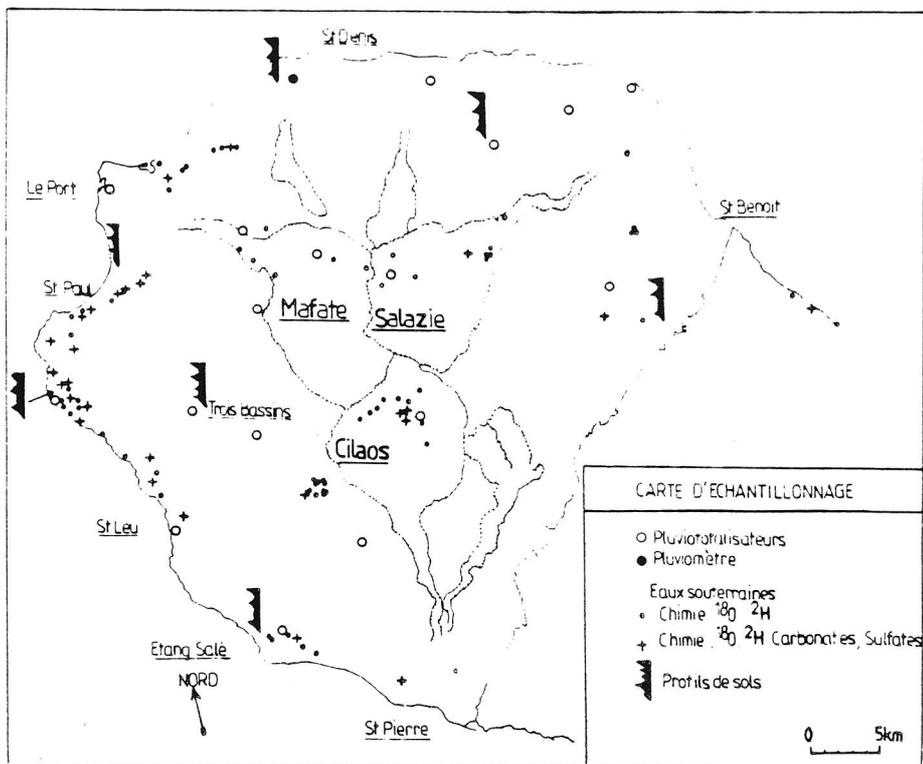


Fig.25: Carte d'échantillonnage.

Les pluviototalisateurs essaient de rendre compte de l'ensemble des pluies. Les profils de sols sont disposés sur l'ensemble du Massif, avec une préférence pour la côte ouest, où le déficit hydrique est plus marqué. L'échantillonnage des eaux et des isotopes du carbone et du soufre suit la même logique, en privilégiant la côte ouest dont la détermination des réserves en eau est primordiale.

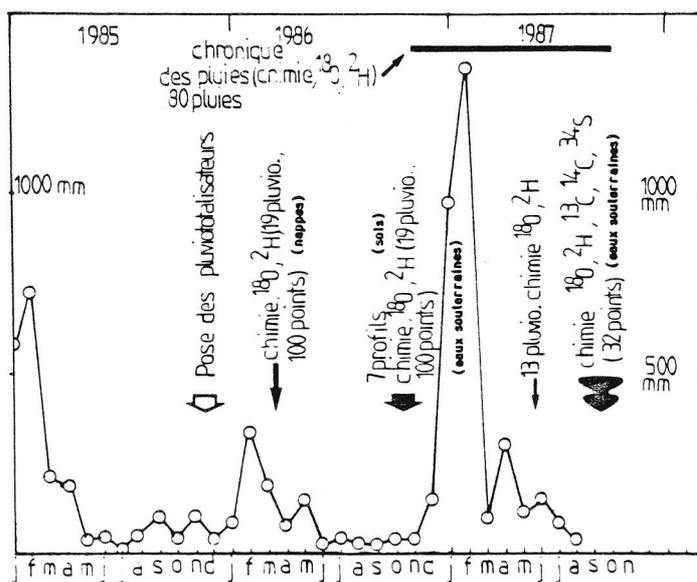


Fig.26: Chronique des hauteurs d'eau mensuelles à la Montagne avec les périodes d'échantillonnage des pluies, de sols, d'eaux souterraines. Les flèches figurent les périodes d'échantillonnage.

II.1 L'échantillonnage.

Il a été effectué selon les trois aspects complémentaires de l'étude que sont les eaux de pluies, les eaux des sols et les eaux souterraines.

II.1.1 Prélèvements des eaux de pluies.

Les pluies représentent "l'entrée" du système hydrologique, elles constituent la base de la présente étude puisque leur qualité chimique et isotopique sert de référence dans l'étude des eaux des sols et des eaux souterraines. Il s'agit donc de décrire les variations de teneurs sur l'ensemble du massif (variations spatiales) et dans le temps (variations annuelles, saisonnières, mensuelles) La taille du terrain exploré a limité pour des raisons de représentativité spatiale la fréquence d'échantillonnage. Notre choix s'est porté vers :

- un prélèvement saisonnier sur tout le massif, pour rendre compte des variations spatiales et temporelles (annuelles et saisonnières),
- un prélèvement journalier en un point, pour rendre compte des variations à court pas de temps (mensuel, journalier).

II.1.1.1 Les prélèvements saisonniers des eaux de pluies.

II.1.1.1.1 Les dispositifs de prélèvement.

Les pluviomètres totalisateurs utilisés sont des fûts métalliques de 200 l équipés d'un entonnoir de taille variable en fonction des précipitations moyennes annuelles des sites choisis. Deux litres d'huile alimentaire par fût et un dispositif de tube plongeant évitent l'évaporation et empêchent les oiseaux de boire l'eau échantillonnée.

Bien qu'abondamment lavés, ces fûts ayant contenu une résine synthétique, l'intégrité chimique des eaux de pluies ainsi collectées ne peut être entièrement assurée pour tous les éléments. Néanmoins, après un essai de conservation d'eau distillée pendant un mois, aucune trace d'ions Cl^- et F^- n'a été détectée.

II.1.1.1.2 Les sites choisis.

Dix-neuf pluviomètres totalisateurs ont été disposés sur l'ensemble du massif. Leur emplacement a été choisi selon des critères de représentativité et d'accessibilité (sauf pour le cirque de Mafate qui ne présente pas d'équipement routier) (Fig.25).

De plus, la proximité des pluviomètres de la Météorologie Nationale a permis un contrôle rapide des quantités échantillonnées et même parfois de disposer d'une chronique des températures.

II.1.1.1.3 Les prélèvements.

La chronique des prélèvements s'établit comme suit (Fig.26):

NOVEMBRE 85	pose des fûts	
FIN MARS 86	premier relevé	saison des pluies
FIN SEPTEMBRE 86	deuxième relevé	saison sèche
DEBUT AVRIL 87	troisième relevé	saison des pluies (dont cyclone Clotilda)

II.1.1.2 Les prélèvements journaliers.

Au lieu dit "La Montagne" (commune de S^t Denis), une chronique journalière a été établie, avec groupement des pluies trop faibles. Elle a fourni 80 échantillons de novembre 86 à octobre 87. Le dispositif choisi est constitué d'un pluviographe "précis mécanique", dont on a ôté le mécanisme, à entonnoir de 400 cm². L'entonnoir est relié à un réservoir, prélevé tous les jours, inséré dans le corps de l'instrument. Lors du cyclone Clotilda, les intensités atteintes étaient telles, que l'on a été obligé d'abandonner la mesure des hauteurs d'eau pour recourir à un mode de prélèvement instantané.

II.1.2 Les prélèvements de l'eau des sols.

La variété et le nombre de sites nécessaires à une étude représentative des différentes conditions d'évapotranspiration ont écarté le mode de prélèvement par bougie poreuse. La méthode employée, plus souple, consiste à effectuer des profils de sol (cf. II.1.2.1). L'eau du sol et les sels primitivement dissous seront ensuite extraits au laboratoire (cf. II.1.2.2).

Rappel: Le terme "sol" est pris ici dans un sens large, qui intègre le "sol" du pédologue (sensu stricto) et une partie de la roche mère (il s'agit des premiers mètres de terrain). L'expression la plus appropriée, serait : partie (superficielle) de la zone non saturée.

II.1.2.1 Les prélèvements des sols.

Ces prélèvements ont été effectués au cours de la fin de la saison sèche en octobre 1986, afin de bénéficier des conditions d'assèchement maximum des horizons superficiels des sols. Les sept profils réalisés (Fig.25), de profondeurs variables (mais < à 4m), sont situés à des altitudes très différentes (deux au vent, cinq sous le vent).

Le profil est effectué avec une tarière à main à joue ouverte dans le cas de matériaux meubles, et à la main dans le cas de matériaux détritiques non pénétrables à la tarière (profil de S^t Paul, par exemple). Le matériel, retiré des joues de la tarière, est conditionné dans des boîtes de pédologues rendues étanches par un joint de ruban adhésif. La méthode présente cependant quelques limites:

- l'estimation des profondeurs d'échantillonnage est imprécise,
- la structure du matériel est modifiée.

II.1.2.2 Extraction de l'eau des sols.

L'eau des sols est extraite par distillation des eaux sous vide selon la technique en usage au "Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique" de l'Université Paris Sud, Orsay. Cette méthode performante, même pour des teneurs en eau très faibles, a été employée par de nombreux auteurs (Gouvea da Silva Rosa, 1980; Zouari, 1983 ; Yousfi, 1984 ; Colin Kaczala, 1986). L'eau recueillie dans les pièges sert à la mesure des teneurs en isotopes constitutifs de l'eau .

Rappel sur la distillation sous vide: Les sols, après avoir été gelés dans un mélange carboglace-acétone, sont mis sous vide afin d'évacuer les incondensables, le CO_2 . La distillation proprement dite s'opère en "circuit fermé" entre les échantillons de sols portés à la température d'un bain thermostaté à 30 degré Celsius et des " pièges" à azote liquide.

II.1.2.3 Extraction des sels par lixiviation des sols secs.

La méthode employée permet une estimation qualitative des teneurs en ions des eaux du sol. La mesure ainsi obtenue ne rend compte des teneurs en éléments dissous de l'eau primitivement contenue dans le sol que pour les éléments non constitutifs du sol, comme le chlorure dans le matériel volcanique par exemple.

Rappel sur la lixiviation: une quantité connue de sol étuvé est agitée dans un volume connu d'eau déminéralisée pendant un temps supérieur à la stabilisation de la conductivité (environ 8h, empiriquement). La solution obtenue est filtrée sur membrane colloïdale (0,45µm) avant la mesure de la concentration.

II.1.2.4 Estimation des teneurs volumiques.

Les densités volumiques sont estimées par pesée d'un volume connu d'échantillon. Il ne s'agit bien sûr que d'une estimation car le prélèvement lui-même ne conserve pas la structure du sol en place. Cette mesure est d'autant plus incertaine dans les andosols où la porosité dépend étroitement du compactage (Rosello, 1984)... qui est essentiellement le fait du poids du "train de tiges" de la tarière. Néanmoins, cette mesure est la seule qui nous permette de relier les teneurs pondérales en éléments obtenues par lixiviation, aux concentrations dans l'eau des sols. Il faut également noter que la porosité, qui est un paramètre essentiel des modélisations de flux en zone non saturée, est d'une estimation délicate du fait de l'incertitude qui pèse sur la densité du matériel solide, surtout pour les fractions fines des andosols dont il est difficile de séparer eau "constitutive" et eau de "porosité". On se base donc généralement sur un niveau "saturé en eau" dont la porosité servira de référence. Il n'en reste pas moins que la porosité reste une notion incertaine surtout dans les andosols qui sous certaines conditions deviennent "liquides", provoquant de forts glissements de terrains.

II.1.3 Le prélèvement des eaux souterraines.

Les prélèvements des eaux souterraines sont organisés dans le temps en **trois campagnes** qui se sont déroulées dans l'ordre suivant :

- mars 86 : chimie, ^{18}O , ^2H , 100 points.
- octobre 87 : chimie, ^{18}O , ^2H , 100 points.
- aout-septembre 88: chimie, ^{18}O , ^2H , espèces isotopiques des carbonates et sulfates aqueux, 32 points.

Les points d'eau échantillonnés sont reportés en figure 25 et décrits en annexe 26. L'objectif des deux premières campagnes était de rechercher des points représentatifs parmi les points d'eau recensés de la Réunion. Les problèmes de ressources en eau sont plus aigus sur la côte Ouest , ceci nous a conduit à privilégier celle-ci dans l'échantillonnage. Le premier choix s'est fondé sur les données existantes de la banque de données du sous-sol (B.S.S.) gérée par le S.G.R. (Service Géologique Régional, S^t Denis).

Les prélèvements concernent :

- des sources (ou les cascades qu'elles génèrent pour les sources inaccessibles des remparts);
- des puits et forages non équipés et des piézomètres (avec une sonde à ficelle);
- des puits et les forages "en pompage" (à partir des exaures ou des robinets de tête de puits).

Les prélèvements sont effectués en fonction des mesures prévues:

- pour la **chimie** : des flacons plastiques d'un litre stockés au frais;
- pour les **isotopes stables de l'eau** : des piluliers en verre ambré de 30ml;
- pour le prélèvement du **carbone inorganique total dissous (C.I.T.D)** : le

principe de la méthode préconisée par l'A.I.E.A. (Agence Internationale pour l'Energie Atomique) a été employée, après simplification. Les carbonates sont précipités à pH basique par addition d'un excès de $\text{BaCl}_2(2\text{H}_2\text{O})$.

Rappel sur le prélèvement du C.I.T.D: Les faibles concentrations en carbone inorganique dissous des eaux, impliquent, pour la mesure des activités en carbone 14 des prélèvements d'eau importants (jusqu'à 220 litres !) dans la plupart des cas. De plus les précipités sont plus longs à se déposer (environ 4heures). Nous avons donc dû abandonner , pour les mesures des teneurs en carbone 14 les points d'eau trop éloignées des voies carrossables.

-Pour le prélèvement des **sulfates dissous** : précipitation par addition d'un excès de $\text{BaCl}_2(2\text{H}_2\text{O})$ à pH acide.

II.2 Les mesures effectuées et les méthodes employées.

II.2.1 Mesures de terrains.

Selon les appareillages disponibles :

-La température de l'eau (Thermomètre digital à thermocouple Quick, précision théorique 1/10)

-Le pH de l'eau (pH-mètre de terrain à électrode combinée, précision en fonction de la charge ionique des eaux, de l'état de l'électrode.... 0,2 à 0,5 unité pH).

Remarque : Les fortes imprécisions sont le fait des eaux très peu minéralisées, à partir de l'instant où l'électrode est plongée dans l'eau, la mesure dérive généralement pendant un long moment, propice à la rééquilibration du système carbonaté, l'on mesure alors un pH d'équilibration avec le CO_2 atmosphérique, ce qui est moins le cas dans les solutions plus tamponnées.

-La conductivité de l'eau (conductimètre de terrain HAESCHLE, lecture sur deux chiffres)

-Le titre alcalimétrique complet (T.A.C.) (Mesure à la burette de précision avec HCl N/10 et suivi au pH-mètre)

II.2.2 Mesures de laboratoire.

Les mesures effectuées sur le terrain ont été doublées au laboratoire. La conductivité étant alors mesurée au $1/10^\circ$ de $\mu\text{S.cm}^{-1}$, le pH et le T.A.C. avec une précision et une reproductibilité bien meilleures .

II.2.2.1 Mesures des concentrations chimiques.

Ces mesures ont été effectuées en collaboration avec quatre laboratoires différents (les mesures étant fréquemment doublées):

- a) Le laboratoire de la Répression des Fraudes (L.R.F.) (D.D.A., S^t Denis de la Réunion) , directeur M. Olek.
- b) Le laboratoire de Chimie Minérale de l'Université de la Réunion (L.C.M.U.R.) (Le Chaudron) avec la collaboration amicale de M^{elle} Cuet, assistante, et de M. Roche, maître de conférence.
- c) Le Centre Hospitalier Départemental de S^t Pierre (C.H.D.P.) de la Réunion sous la direction de M. Lebas.
- d) Le Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de l'Université de Paris Sud (Orsay) avec la collaboration amicale de M^{me} Roussin-Bariac, contractuelle.

Le tableau ci-dessous résume les analyses chimiques effectuées :

Méthodes employées	espèces mesurées	laboratoires	pluies	eaux	sols
			nombres de mesures		
Emission de flamme	Na ⁺ , K ⁺	LRF, LCMUR	37	233	
Absorption atomique	Ca ²⁺ , Mg ²⁺	CHDP, LCMUR	25	233	
Chrom. Phase liquide	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ²⁻ , PO ₄ ²⁻ , Cl ⁻	LRF	37	133	
Technicon	Cl ⁻	LHGI	100		
Colorimétrie	SiO ₂	LCMUR, LRF	19	233	
Potentiométrie	Cl ⁻	LCMUR		100	66
Electrode spécifique	F ⁻	LCMUR	15	80	

Rappel sur la mesure potentiométrique des concentrations en Cl⁻ : La méthode utilisée est le dosage volumétrique avec une solution de nitrate d'argent (N/100) avec détermination du point équivalent par suivi potentiométrique à l'électrode d'argent.

II.2.2.2 Mesures isotopiques.

Toutes les mesures isotopiques ont été réalisées au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de l'Université Paris -Sud.

Rappel : On appelle variété isotopique d'un élément tout atome ayant les propriétés chimiques de l'élément en question mais différent de celui ci par sa masse. On distingue les isotopes stables et les isotopes radioactifs. La mesure des isotopes stables est effectuée au spectromètre de masse, alors que les isotopes radioactifs sont mesurés par comptage en scintillation liquide de leur activité ou par spectrométrie de masse par accélération de particules.

Les isotopes utilisés dans cette étude sont:

- les isotopes de la molécule d'eau: l'oxygène 18 (¹⁸O), le deutérium (²H), le tritium (³H).
- les isotopes du carbone inorganique dissous dans l'eau: le carbone 13 (¹³C), le carbone 14, (¹⁴C).
- Les isotopes du sulfate aqueux le soufre 34, (³⁴S), l'oxygène 18 (¹⁸O_{sulf}).

Rappel : Pour les isotopes stables, ^{18}O , ^2H , ^{13}C , ^{34}S , $^{18}\text{O}_{\text{sulf}}$, on mesure le rapport d'abondance (R) de l'isotope considéré (le rapport du nombre d'atomes de la variété isotopique sur le nombre d'atomes de la variété dominante), cette mesure se fait sur un gaz. Pour les isotopes radioactifs, ^{14}C et ^3H , la mesure se fait en terme d'activité (nombre de "coups" par minute et par gramme) et sur un liquide. Dans la plupart des cas les échantillons doivent subir une préparation préalable.

II.2.2.2.1 Préparations pour mesure au spectromètre de masse.

Elles sont classiques (Filly, 1980).

L'abondance de ^{18}O est mesurée sur du CO_2 industriel après échange isotopique complet avec l'échantillon pendant 24h à 25°C .

L'abondance de ^{13}C est mesurée sur le CO_2 dégagé par une attaque acide complète de BaCO_3 .

L'abondance de ^2H est mesurée sur l'hydrogène issu de la réduction de l'eau par de l'uranium porté à 800°C .

L'abondance de $^{18}\text{O}_{\text{sulf}}$ est mesurée sur du CO_2 obtenu par réduction de BaSO_4 par du graphite à 1200°C .

L'abondance en ^{34}S est mesurée sur du SO_2 obtenu par oxydation du soufre.

II.2.2.2.2 Préparation pour comptage en scintillation liquide.

L'activité du ^{14}C est mesurée sur du benzène synthétisé à partir du CO_2 dégagé par attaque acide du BaCO_3 (Fontes, 1971).

L'activité du ^3H est mesurée en comptage direct sur l'eau à laquelle est ajoutée un agent scintillateur.

II.3 Unités employées.

II.3.1 Unités chimiques.

Il est à noter que du fait des faibles minéralisations rencontrées dans les eaux réunionnaises, l'on est en droit d'assimiler le litre de solution à une masse de un kilogramme. Les teneurs chimiques peuvent donc être assimilées aux concentrations; l'unité principale utilisée est le mg.l^{-1} , mais aussi le meq.l^{-1} , et la millimol.l^{-1} .

Les activités chimiques, qui sont sans dimension, ont été calculées par le programme WATEQ F., (Plummer *et al*, 1976) selon la formule simplifiée de Debye-Hückel. Elles sont généralement exprimées vis-à-vis de la millimol.l^{-1}

II.3.2 Unités isotopiques.

II.3.2.1 Les isotopes stables.

Le rapport d'abondance (\mathcal{R}) est une unité difficile d'emploi, il est donc plus aisé de définir une unité relative à un étalon naturel.

On définit donc l'unité delta pour mille ($\delta \text{‰}$) (ou plus simplement le ‰ vs étalon):

$$\delta \text{‰} = [(\mathcal{R}_{\text{échantillon}} - \mathcal{R}_{\text{étalon}}) / \mathcal{R}_{\text{étalon}}] \cdot 1000 \quad (1)$$

où $\mathcal{R}_{\text{échantillon}}$ est le rapport d'abondance de l'échantillon,

$\mathcal{R}_{\text{étalon}}$ est le rapport d'abondance de l'étalon.

Pour les isotopes stables de la molécules d'eau et l'oxygene 18 des sulfates aqueux, l'étalon est la composition isotopique moyenne de l'eau de mer, c'est le SMOW (*Standard Mean Ocean Water*) (Craig, 1961a).

Pour le carbone 13, l'étalon est la composition isotopique de la calcite d'un rostre de *Belemitella americana* de la formation de Pee Dee (Crétacé supérieur) en Caroline du Nord (U.S.A.), c'est le PDB (Craig, 1957).

Pour le soufre 34 des sulfates, l'étalon est la composition isotopique d'un sulfure (troïlite) provenant d'une météorite tombée à Cañon Diablo (New -Mexico, U.S.A.), c'est le CD.

II.3.2.2 Isotopes radioactifs.

Pour le tritium l'unité employée est l'Unité Tritium (UT) qui correspond à un rapport d'abondance atomique de 10^{-18} .

Pour le carbone 14 l'unité employée est l'activité mesurée, ramenée en parts pour cent (%) d'un étalon qui correspond à $13,56 \pm 0,07$ désintégrations par minute et par gramme de carbone (Olsson, 1968; Unterweger *et al*, 1980) et qui est égale à 0,95 fois l'activité au cours de l'année 1950 de l'acide oxalique, étalon distribué par le N.B.S. (*National Bureau of Standards*, Washington DC, USA).

CHAPITRE TROISIEME

ETUDE HYDROCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES PRECIPITATIONS

RAPPEL DU SOMMAIRE DU
CHAP. III: ETUDE HYDROCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES PRECIPITATIONS

Introduction à l'étude des pluies: caractéristiques de la période d'échantillonnage.

III.1 Etude hydrochimique des précipitations	p.42
III.1.1 Introduction	p.42
III.1.2 Résultats sur l'échantillonnage saisonnier	p.43
III.1.2.1 Le domaine de variation des teneurs	p.43
III.1.2.2 La répartition spatiale	p.45
III.1.2.3 Conclusions	p.45
III.1.3 Résultats sur l'échantillonnage saisonnier	p.47
III.1.3.1 Le domaine de variation des teneurs	p.47
III.1.3.2 La relation entre hauteurs journalières de pluie et les teneurs en ions chlorures	p.47
III.1.3.3 Conclusions	p.49
III.2 Etude isotopique des précipitations	p.51
III.2.1 Rappels théoriques	p.51
III.2.1.1 Le fractionnement isotopique	p.51
III.2.1.2 Le comportement isotopique à la condensation	p.52
III.2.1.3 Le comportement isotopique à l'évaporation	p.53
III.2.1.4 Les variations de la composition isotopique des pluies	p.53
III.2.1.4.1 L'effet de la température	p.53
III.2.1.1.4.1.1 Les teneurs annuelles	p.53
III.2.1.1.4.1.2 L'effet saisonnier	p.54
III.2.1.1.4.1.3 L'effet d'altitude	p.54
III.2.1.4.2 L'effet de masse	p.54
III.2.1.4.3 L'effet de continentalité	p.54
III.2.2 La répartition spatiale des teneurs en ^{18}O	p.57
III.2.2.1 Saison cyclonique 1985-1986	p.57
III.2.2.1.1 La carte des teneurs	p.57
III.2.2.1.2 Les gradients d'altitudes	p.57
III.2.2.1.3 Les gradients thermométriques	p.59
III.2.2.2 Saison sèche 1986	p.59
III.2.2.2.1 La carte des teneurs	p.59
III.2.2.2.2 Les gradients d'altitudes	p.59
III.2.2.2.3 Les gradients thermométriques	p.59
III.2.2.3 Saison cyclonique 1986-1987	p.61
III.2.2.3.1 Carte des teneurs	p.61
III.2.2.4 Conclusions sur l'étude spatiale des teneurs	p.61
III.2.3 Les variations saisonnières en ^{18}O	p.63
III.2.3.1 La chronique mensuelle	p.63
III.2.3.2 La quantification de l'effet de masse	p.65
III.2.4 La relation entre ^{18}O et ^2H dans les pluies	p.68
III.3 Conclusions sur l'étude hydrochimique et isotopique des pluies	p.70

		1986														1987				
		N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M
CHAUDRON	H	89,5	304	78	289	259	148	127	15	14	24	11	21	18	216	707	1201	63	363	131
	T	19	22	26	25,6	25	24,6	23	20	20	21	21	23	24	26	25,7	25,8	26	25	24
MONTAGNE	H	105	407	86	336	189	75	154	27	43	33	29	36	37	157	972	1359	100	369	114
	T	20,2	22,5	23,6	23,7	23,7	22,8	20,9	19	18	18,9	19	20,3	21,6	23,5	23,5	23,5	24,6	23,7	21,5
BEAUMONT	H	219	488	219	651	349	269	269	68	70	103	58	125	140	438	1338	2058	357	457	210
	T	15	18	19	18,9	18	17,6	16	13	13	13	13	15	17	19	18,8	19,1	20	19	17
PORT	H	76	113	74	189	46	6	79	7	8	12	16	47	12	62	535	675	84	153	25
	T	24,8	26,5	27,9	27,2	27,4	26,7	24,6	22	21,5	22,1	23	24,2	25,5	27,4	27,7	27,1	28,2	27,4	25,6
P.FRANCE	H	133	257	165	570	119	34	80	26	8	31	13	98	16	397	865	1328	294	157	70
	T	13,8	17,5	17,5	18,9	18	17	14,9	12	11,6	12,3	13	14,2	15,3	18	18,8	19,3	18,9	18,6	16,4
P.MAIDO	H	157	263	131	580	266	37	68	21	11	45	7	32	20	266	865	1328	220	193	85
	T	8,7	11,9	12,6	12,5	12,8	11,8	11,1	8,8	8,1	9,2	9,5	10,6	12,7	13,8	14,5	15,2	14,8	14,8	11,5
ST GILLES	H	102	246	40	110	40	0	42	6	0	0	4	11	50	131	391	608	72	92	31
	T	24	26	27	26,7	27	25,8	24	21	20	21	22	23	25	27	27,2	26,6	27	27	25
C.ALFRED	H	128	256	162	661	160	18	48	17	22	27	9	29	39	287	865	1328	220	116	67
	T	12,7	16,8	16,8	17,8	17,2	14,7	12,6	9,6	9,2	9,8	10	11,6	12,7	17	17,7	18,1	18	18	13
ST LEU	H	141	149	27	146	97	34	40	36	13	12	4	9	24	100	178	454	122	98	39
	T	23	25	26	26,5	26	25,5	23	21	20	21	21	23	24	27	27	26,4	27	26	24
PL MAKES	H	108	175	303	621	218	54	55	195	20	72	159	45	109	283	225	736	298	346	287
	T	15,8	18,8	19,4	20,2	19,5	18,7	15,8	13	12,3	13,7	14	15,4	16,8	19,4	19,8	20,6	20,1	19,3	16,8
ET. SALE	H	90	134	165	102	188	58	36	64	7	11	7	0	47	25	101	314	189	220	111
	T	22,7	24,8	25,7	26,2	25,6	24,9	22,5	20	18,9	19,8	20	22,6	23,8	26,1	26,6	26,1	26,6	25,6	23,6
BAGATELLE	H	150	539	176	531	567	412	281	33	45	99	32	136	90	310	969	1573	157	627	429
	T	21	24	24	24,4	24	23,4	21	19	18	19	20	21	22	24	24,6	24,6	25	24	22
COLOSSE	H	107	384	155	317	395	475	332	32	66	90	34	101	133	290	636	1269	182	713	360
	T	21	24	25	24,6	24	23,6	22	19	19	19	20	21	23	25	24,8	24,8	26	24	22
CASABOIS	H	265	478	178	2077	678	188	177	11	0	147	44	82	79	376	1047	3404	164	432	230
	T	16	19	19	18,4	19	18,5	16	14	13	13	14	16	17	19	20,3	20,4	20	20	17
BEBOURG	H	290	666	202	1530	1400	433	313	89	76	402	106	141	178	416	519	3380	433	1192	547
	T	18	20	21	20,9	21	19,9	18	15	15	16	16	17	19	21	21,1	21,1	22	21	19
TAKAMAKA	H	409	1215	357	1438	1291	1069	548	85	129	370	157	304	275	265	708	2630	724	1445	852
	T	21	24	25	24,6	24	23,6	22	19	19	19	20	21	23	25	24,8	24,8	26	24	22
DOS D'ANE	H	93	229	161	555	110	98	78	11	8	25	3	38	10	171	1056	1607	217	160	46
	T	16,7	19,6	20,4	20,9	19,8	19,1	17,2	15	13,8	14,8	15	17	18,4	20,6	20,7	20,9	21,3	21,1	18,4
AURERE	H	129	303	79	1485	518	36	75	13	4	109	1	34	68	213	1098	2411	153	254	57
	T	17,2	20,2	20,8	20,8	20,4	19,1	16,9	15	13,8	15	16	17	18,7	21	21	21,3	21,3	20,8	18,9
CILAOS	H	166	249	164	1763	661	71	41	64	12	114	46	18	17	249	393	2130	254	342	159
	T	15,4	18,6	19	19,8	19,4	17,9	15,6	12	12	13	13	15,3	16,8	19,2	19,7	20,2	19,8	19,1	16,6

Tab.1: Hauteurs et températures mensuelles des pluies des stations de prélèvements pendant la période d'étude.(mm.et °C)

INTRODUCTION A L'ETUDE DES PLUIES : CARACTERISTIQUES DE LA PERIODE D'ECHANTILLONNAGE.

La période d'échantillonnage s'étend d'octobre 1985 à juillet 1987. Les hauteurs d'eau mensuelles recueillies par les pluviomètres totalisateurs et les températures moyennes mensuelles de cette période sont figurées dans le tableau 1.

Ces valeurs sont extraites des Bulletins Climatologiques Mensuels (B.C.M.) de la Météorologie Nationale. Les relations entre stations, établies par Bargeas (1984), nous ont permis de combler les lacunes des chroniques et d'estimer les hauteurs et les températures pour les pluviototalisateurs éloignés des stations météorologiques.

La saison cyclonique 1985-86 est caractérisée (Fig.27) par un mois de janvier déficitaire équilibrant un mois de février excédentaire. Au regard des très grandes variations des hauteurs précipitées entre les saisons cycloniques, cette saison peut être décrite comme moyenne.

La saison sèche 1986 est (Fig.27) une saison moyenne puisque la situation pluviométrique est conforme à la normale pour toutes les stations.

La saison cyclonique 1986-87 est (Fig.27) remarquable pour son excédent pluviométrique considérable au mois de février 1987, celui-ci est dû au passage sur l'île de la forte perturbation tropicale Clotilda.

En résumé, le cycle hydrologique 1985-1986 représente un cycle normal, alors que la saison cyclonique 1986-1987 est une période exceptionnelle.

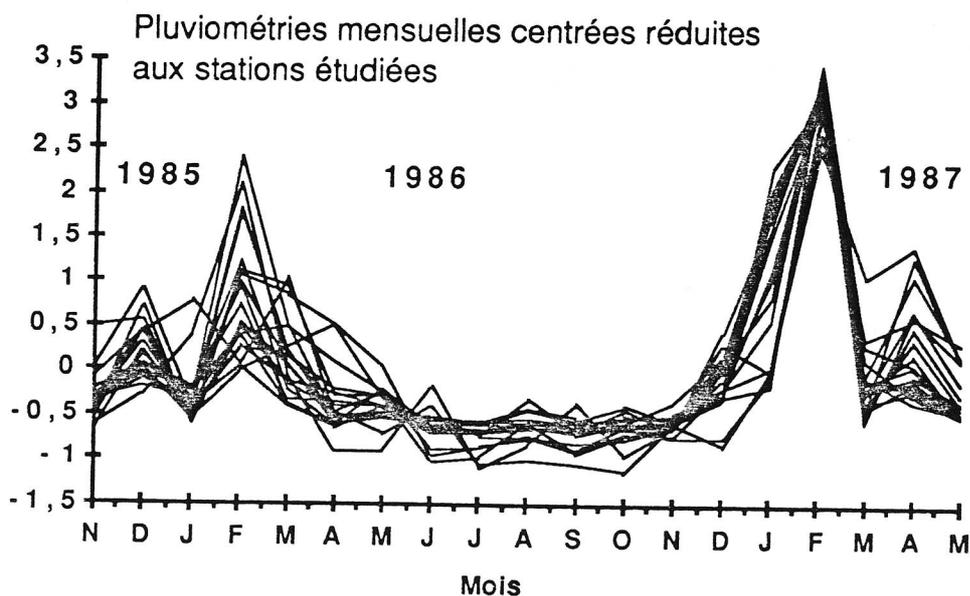


Fig.27: *Ecart à la normale réduit des pluviométries mensuelles sur les postes dont on a étudié les teneurs chimiques et isotopiques. Le cycle 1985-1986 apparaît comme une année hydrologique proche de la normale.*

III.1 ETUDE HYDROCHIMIQUE DES PRECIPITATIONS.

III.1.1 Introduction.

Les précipitations contiennent une certaine quantité d'éléments dissous qu'il est nécessaire de prendre en compte dans un bilan géochimique global.

Ces éléments sont issus (Junge, 1963), soit d'un lessivage humide au sein du nuage c'est le "Rain out", soit d'un lessivage humide sous le nuage c'est le "Wash out" ou bien plus simplement du contact avec des dépôts solides sur le pluviomètre. Les aérosols marins sont considérés comme la principale source d'éléments dans les pluies, mais il faut aussi considérer les épanchements solides (cendres volcaniques, poussières d'érosion) et gazeux (les plantes et leurs combustions).

L'influence marine se traduit généralement par une décroissance à allure logarithmique des teneurs en Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} en fonction de la distance à la mer et/ou de l'altitude (Meybeck, 1984). Cette décroissance est généralement attribuée à la chute d'aérosols de plus en plus fins et à un renouvellement des nuages par une vapeur d'origine continentale appauvrie en éléments issue de l'évapotranspiration.

	ALTITUDE	HAUTEUR	COND.	pH.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HPO_4^-	Br^-	F^-	SiO_2	T.A.C
	(mètres)	DE PLUIES	μs													meq.
	(mm)	cm^{-1}	MILLIGRAMMES PAR LITRE					MILLIGRAMMES PAR LITRE					par litre			
SAISON CYCLONIQUE 85-86																
ST LEU	5	322			3,80	0,61	1,77	0,75	10,3							
T.BASSINS	1100	1168			0,17	0,02	0,11	0,09	2,7							
Le PORT	5	366			10,00	2,25	7,50	1,24	22,3							
P.MAIDO	2190	1335			0,03	0,01	1,09	0,05	2,1							
BEAUMONT	1105	1876			0,52	0,80	0,08	0,06	1,5							
St GILLES	5	255			4,00	1,27	8,00	0,98	10,6							
TAKAMAKA	649	4541			0,80	0,24	1,49	0,10	2,8							
Gr.ILET	1315	3582			0,11	0,02	0,04	0,07	2,5							
BELOUVE	1100	3567			0,95	0,76	1,60	0,21	3,0							
BAGATELLE	250	2016			0,90	0,07	0,34	0,16	3,9							
MONTAGNE	400	1089			0,80	0,14	0,32	0,19	3,5							
MAKES	890	1334			0,07	0,04	0,15	0,06	2,8							
COLOSSE	10	1450			1,65	0,35	1,74	0,31	5,7							
EI.SALE	25	611			0,60	2,25	4,45	0,15	3,4							
DOS d'ANE	915	1080			0,55	0,33	1,67	0,31	3,0							
IRFA	1520	1245			0,08	0,13	1,46	0,09	2,1							
AURERE	890	2334			0,20	0,01	0,04	0,14	1,8							
CAMPUS	75	1064			0,90	0,15	0,34	0,24	2,7							
CILAOS	1210	2886			0,03	0,22	0,55	0,05	1,4							
SAISON SECHE 1986																
BELOUVE 86	1100	1437	49,6	4,01	0,60	0,10			0,0	0,0	0,00	0,00	0,00		1,10	0,00
MAIDO 86	2190	172	60	6,67	0,40	0,20			0,0	0,0	0,00	0,00	0,00		0,21	0,54
BEAUMONT	1105	761	19,4	5,08					0,0	0,0	0,00	0,00	0,00		0,47	0,08
SAISON CYCLONIQUE 1986-1987																
ST LEU	5	1024	114,5	3,91	5,50	0,90			10,7	0,0	3,00	0,00	0,07		1,80	0,00
COLOSSE	10	3492	63,3	5,46	3,00	0,35			14,2	0,0	0,00	0,00	0,03		2,40	0,18
CAMPUS	75	2654	37,8	4,6	0,60	0,10			1,7	0,0	0,00	0,00	0,00		0,74	0,02
MAKES	890	2204	38,7	6,82	0,60	0,20			1,4	0,0	0,00	0,00	0,00		1,08	0,02
IRFA	1520	2922	35,4	5,22	0,50	0,70			1,6	0,0	0,00	0,00	0,00		3,16	0,11
P.MAIDO	2190	2972	68,4	3,61	0,20	0,10			0,2	0,0	0,00	0,00	0,00		0,08	0,00
EI.SALE	25	959	53,4	4,38	1,20	0,20			2,8	0,0	0,00	0,00	0,00		0,38	0,00
BEAUMONT	1105	5042	17,8	6,58	0,20	0,30			0,7	0,0	0,00	0,00	0,00		0,38	0,07
TAKAMAKA	649	6734	55,4	6,9	0,30	0,30			1,0	0,0	0,00	0,00	0,00		0,14	0,35

Tab.2: Analyses chimiques partielles des pluies sur l'échantillonnage saisonnier.

III.1.2 Résultats sur l'échantillonnage saisonnier.

III.1.2.1 Domaine de variation.

Les analyses effectuées (Tab.2) sont des analyses partielles, car pour des ions comme SO_4^{2-} , NO_3^- , les faibles teneurs sont trop souvent inférieures aux seuils de détections.

Les paramètres statistiques essentiels sont calculés pour chaque variable analysée et pour toutes les stations disponibles (population 1 à effectif N1). Dans un deuxième temps on effectue le même calcul en écartant les stations côtières (population 2 à effectif N2) : les valeurs calculées des moyennes (Moy), des écarts types (σ), et des coefficients de variations (σ/Moy) sont :

mesure	N1	N2	Moy1	Moy 2	$\sigma 1$	$\sigma 2$	$\sigma 1/\text{Moy}1$	$\sigma 2/\text{Moy}2$
Cond ($\mu\text{s.cm}^{-1}$)	12	10	51,1	43,6	24,6	15,9	0,5	0,4
pH	12	10	5,27	5,39	1,2	1,2	0,2	0,2
Na^+ (mg.l^{-1})	30	24	1,31	0,47	2,1	0,3	1,6	0,6
K^+ (mg.l^{-1})	30	24	0,44	0,22	0,6	0,2	1,4	0,9
Ca^{2+} (mg.l^{-1})	19	14	1,72	0,66	2,3	0,6	1,3	0,9
Mg^{2+} (mg.l^{-1})	19	14	0,27	0,13	0,3	0,1	1,1	0,8
Cl^- (mg.l^{-1})	30	21	4,27	2,18	4,7	0,9	1,1	0,4
SiO_2 (mg.l^{-1})	13	10	0,95	0,77	0,9	0,9	0,9	1,2

Trois groupes de paramètres apparaissent:

° Le pH et les teneurs en SiO_2 ne varient pas en fonction de l'intégration des stations côtières; les teneurs sont indépendantes de la proximité marine.

° La conductivité et les teneurs en K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} réagissent à la proximité de l' Océan, et les coefficients de variation sont plus faibles si l'on considère les stations éloignées de la côte. Ceci pourrait traduire une origine mixte de ces éléments et du paramètre conductivité. Il faut ici invoquer un apport par retombées solides comme des poussières d'origine volcanique ou érosive .

° Les teneurs en Cl^- et Na^+ indiquent une influence marine très nette, le coefficient de variation diminue **fortement** pour les pluviomètres éloignés de l'océan. Ces deux éléments auraient donc une origine océanique exclusive.

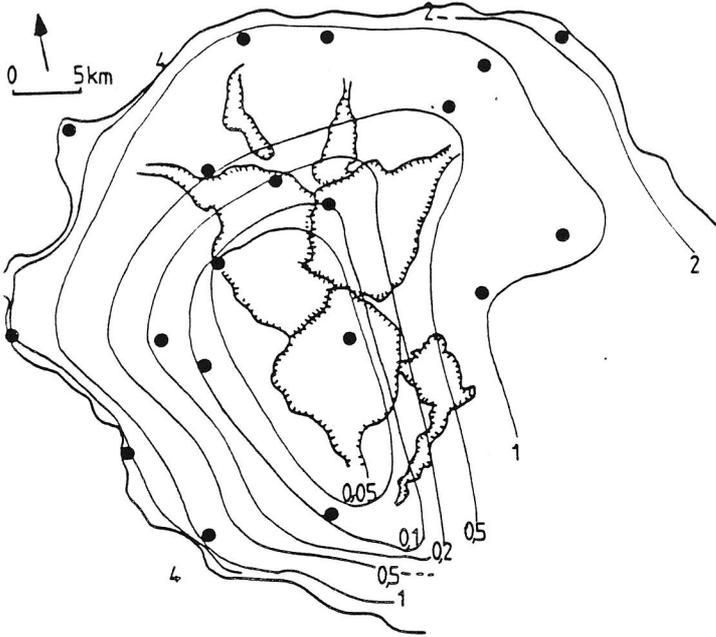


Fig.28: Esquisse des isoteneurs en ions Na^+ (mg.l^{-1}) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986. La répartition apparaît comme fortement marquée par l'altitude.

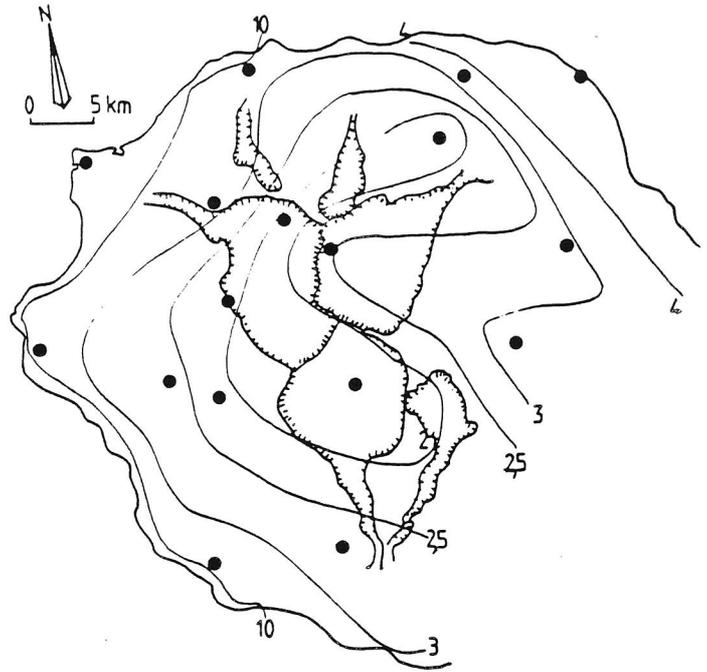


Fig.29: Esquisse des isoteneurs en ions Cl^- (mg.l^{-1}) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986. La répartition prend une allure de "croissant" qui reflète peut-être l'influence de la déflation de l'alizé ou d'une pollution par le volcan de la Fournaise (poussières, cendres, gaz, etc...).

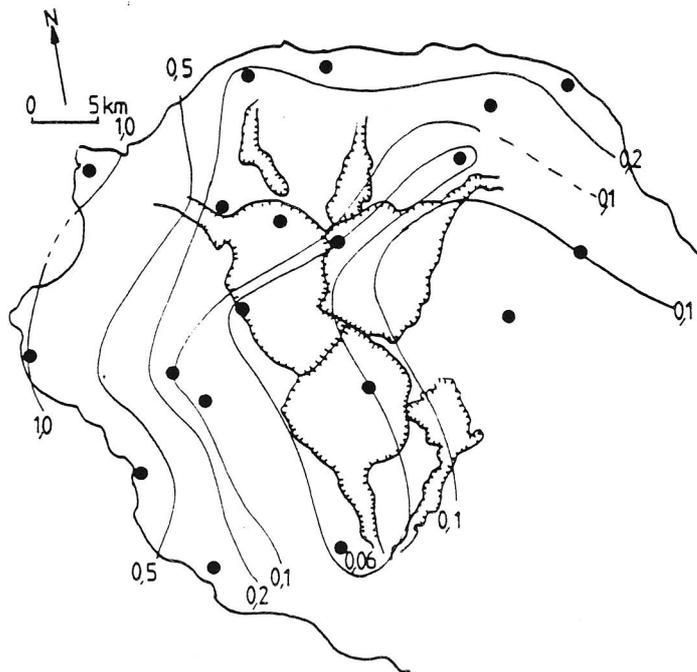


Fig. 30: Esquisse des isoteneurs en ions Mg^{++} (mg.l^{-1}) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986. La répartition prend une allure de croissant que l'on peut relier aux mêmes causes que pour l'ion Cl^- .

III.1.2.2 Répartition spatiale.

Les répartitions des teneurs en Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} des pluies de la saison cyclonique 1985-86 (Fig. 28,29,30,31,32) montrent que toutes les teneurs sont plus fortes sur les côtes.

Toutefois, il apparaît que les teneurs sont plus élevées sur la côte ouest que sur la côte est, ce qui pourrait s'expliquer par une contribution notable, dans les secteurs les plus secs, de poussières soulevées par le vent, alors que, sur la côte est, les sols sont maintenus constamment humides.

Pour Na^+ (Fig.28), la répartition est extrêmement simple et la présence des cirques ne semble pas influencer les concentrations dans les pluies. Cependant, dans les hauts de l'Est, la courbe d'isoteneur de 1mg.l^{-1} , prend une direction perpendiculaire à la côte, ceci peut s'expliquer par la composante souvent S-E des vents alizés et la présence du Piton de la Fournaise en aval de cette composante.

Pour Cl^- , Mg^{2+} , K^+ (Fig.29,30,31), la répartition est moins simple dans la mesure où, sur le flanc est du Piton des Neiges, les courbes d'isoteneurs 3, 2.5 et 2mg.l^{-1} pour Cl^- , 0.1mg.l^{-1} pour K^+ , 0.5mg.l^{-1} pour Mg^{2+} , montrent des "indentations" de direction générale N-W qui tendraient soit à souligner une déflation des alizés, soit à entériner les hypothèses d'apport d'éléments dus à l'activité volcanique ou à l'érosion éolienne sur le volcan actif dénudé. Les courbes d'isoteneurs minimales ont des allures de croissants qui enveloppent le Piton des Neiges par le N-W.

Pour les teneurs en Ca^{2+} (Fig.32), la répartition est plus complexe puisque deux zones de teneurs minimales existent. Si l'on faisait abstraction d'une valeur et que l'on rejoignait les courbes, la zone de teneur minimale aurait une forme sensiblement identique à celles obtenues pour les autres éléments (Na^+ exclu).

III.1.2.3 Conclusions.

En conclusion, les teneurs en éléments dans les pluies sont régies spatialement par une influence marine modulée par le flux de l'alizé qui contourne les reliefs, imposant des minima de teneurs dans les stations d'altitude "protégées" par la masse du Piton des Neiges (Fig.33). Toutefois, il est possible qu'une certaine partie de ces éléments soit due à des apports solides qui se "déposent" sur l'entonnoir du pluviomètre en provenance des plaines non revêtues de végétation du volcan actif est assez forte.

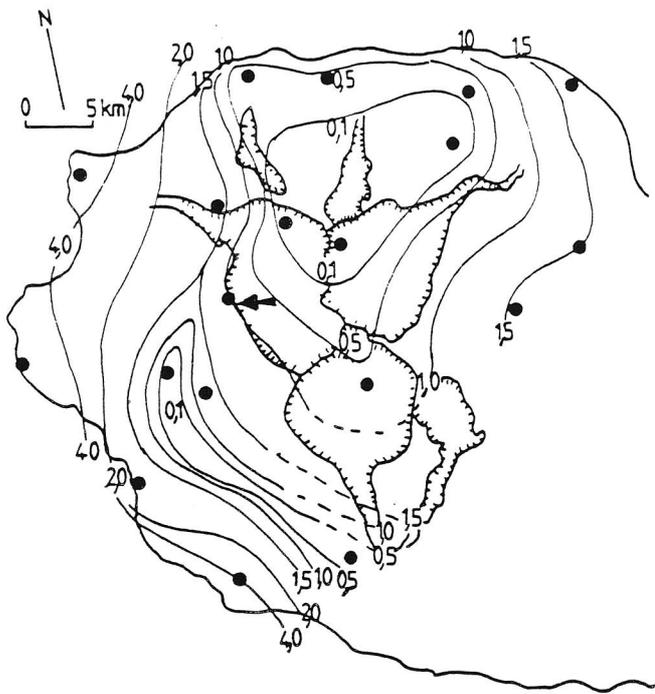


Fig.32: Esquisse des isoteneurs en ions Ca^{2+} ($mg.l^{-1}$) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986. La répartition prend une allure sensiblement différente de celle des autres ions, mais la modification des teneurs en un seul point (fléché) permettrait le dessin de courbes d'isoteneurs avec une forme similaire aux cartes des teneurs en Mg^{2+} , K^+ , Cl^- .

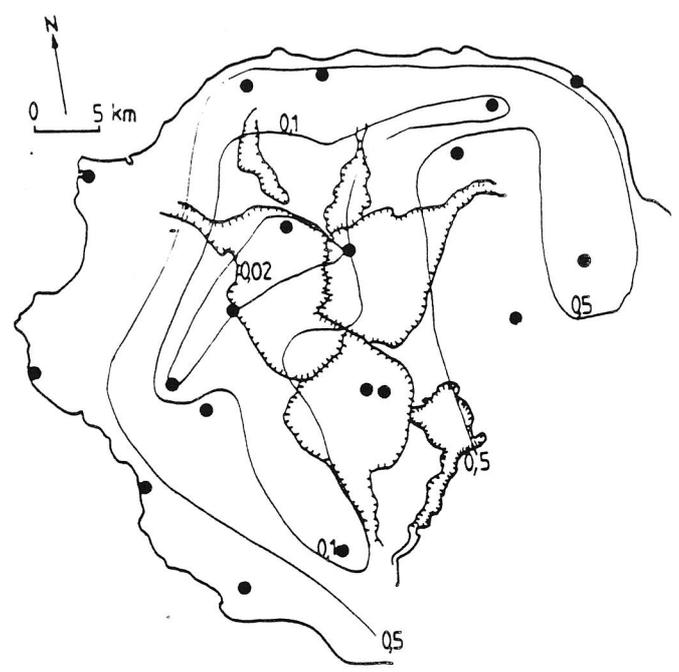


Fig.31: Esquisse des isoteneurs en ions K^+ ($mg.l^{-1}$) des pluies de la saison cyclonique 1985-1986. La répartition prend une allure de croissant que l'on peut relier aux mêmes causes que pour les ions Cl^- et Mg^{++} .

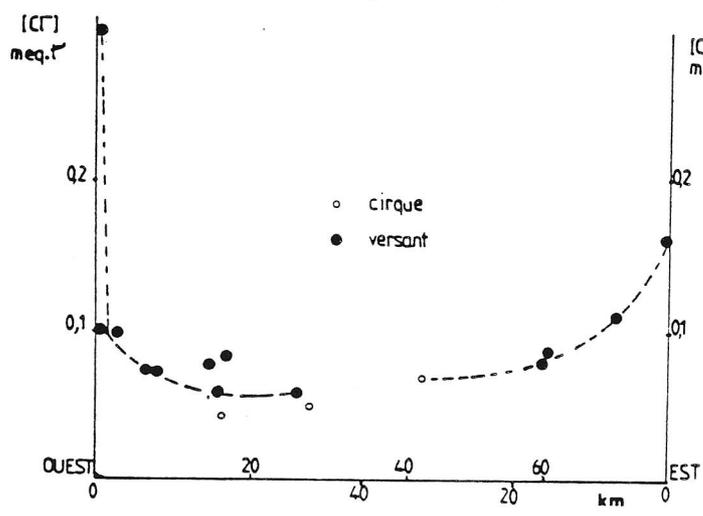


Fig.33: Diminution des teneurs en Cl^- ($meq.l^{-1}$) dans les pluies en fonction de la distance des côtes est et ouest en saison cyclonique 1985-1986. Les teneurs diminuent plus lentement sur la côte est du fait de la direction des vents vers l'intérieur ; les teneurs sont plus élevées sur la côte ouest du fait de l'évaporation.

III.1.3 Résultats sur l'échantillonnage journalier.

Seules les teneurs en ions chlorures ont été mesurées. Les valeurs obtenues, les hauteurs d'eau échantillonnées, sont reportées dans un tableau (Tab.3).

III.1.3.1 Domaine de variation des teneurs journalières à La Montagne.

La moyenne des teneurs journalières observées s'établit à **2,34 mg.l⁻¹** avec un écart-type de **2,21** pour les 48 mesures effectuées soit un coefficient de variation de **0,9**.

La teneur moyenne des précipitations, c'est à dire calculée en effectuant une pondération par les hauteurs journalières des pluies, s'établit à **1,82 mg.l⁻¹**. Ce résultat n'est pas incompatible avec les valeurs observées de l'échantillonnage saisonnier de la population 2 (cf. III.2.1) où la moyenne des teneurs est de **2,18 mg.l⁻¹**. Par contre, comparée à la population 2, les pluies journalières présentent un coefficient de variation beaucoup plus fort (0,4 pour P2). En résumé, les teneurs des précipitations éloignées des côtes varient plus temporellement (à l'échelle journalière) que spatialement.

III.1.3.2 Relation entre hauteurs journalières de pluie teneurs en ions chlorures à La Montagne.

L'histogramme des teneurs journalières montre une répartition multimodale. Plus des 3/4 des teneurs se situent entre 0 et 3 mg.l⁻¹. A l'intérieur de cette classe, les teneurs sont indépendantes des hauteurs de pluies (Fig.34). La moyenne de ces teneurs est de **1,31 mg.l⁻¹** pour un écart type de **0,55** soit un coefficient de variation de **0,42** qui est très proche de celui observé dans la population des pluies éloignées des côtes (population 2). Les fortes teneurs en ions Cl⁻ se répartissent en deux groupes distincts en fonction des hauteurs de pluies.

Pour les pluies inférieures à 20mm et avec des teneurs en ions chlorures supérieures à 3 mg.l⁻¹, il est raisonnable d'invoquer un processus de concentration par évaporation, soit lors de la chute des gouttelettes de pluies à travers une atmosphère désaturée en eau, soit avant prélèvement au contact de l'entonnoir du pluviomètre.

Si l'on considère une hauteur de pluie initiale H_0 , avec une teneur C_0 , donnant par évaporation la hauteur restante H_1 avec une concentration C_1 , par conservation de la masse de l'élément, il vient:

$$H_0 * C_0 = H_1 * C_1 \quad (2)$$

En supposant C_0 égale à la teneur moyenne des pluies non affectées par évaporation (1,31 mg.l⁻¹) le calcul montre un taux d'évaporation entre 60 et 80% pour des hauteurs initiales entre 6 et 30mm.

Pour les pluies supérieures à 20mm et à fortes teneurs, il est difficile d'invoquer le même processus. D'une part les teneurs semblent corrélées positivement aux hauteurs des pluies, d'autre

Jour de l'année	hauteur de pluie (mm)	Cl ⁻ mg. par litre	Jour de l'année	hauteur de pluie (mm)	Cl ⁻ mg. par litre	Jour de l'année	hauteur de pluie (mm)	Cl ⁻ mg. par litre
1/12	18,75		30/1	29,25	1,15	22/3	0,50	1,00
2/12	3,28		2/2	53,50	1,25	25/3	8,75	4,40
5/12	5,75	3,40	3/2	0,65		27/3	2,50	
6/12	0,68		4/2	1,88	2,15	31/3	2,50	6,10
7/12	0,75		5/2	31,75	0,40	1/4	0,25	6,10
8/12	1,58		6/2	58,00	1,85	2/4	13,60	1,65
9/12	0,10	4,05	7/2	39,00	7,40	3/4	40,00	1,90
11/12	14,00		9/2	58,75	0,70	5/4	10,00	0,75
12/12	18,10	3,80	10/2	110,00	0,60	7/4	1,13	7,05
13/12	34,25	1,35	11/2	3,75	1,50	12/4	27,50	1,95
14/12	23,17	1,70	12/2	300,00	1,95	13/4	5,25	1,25
15/12	19,35	1,05	13/2	1000,00	1,25	14/4	46,25	0,95
16/12	1,05		14/2	37,50	1,50	15/4	15,25	1,00
17/12	1,15		15/2	48,50	10,00	16/4	7,25	0,95
20/12	0,25		16/2	27,50	6,60	18/4	2,75	2,50
25/12	1,62		19/2	11,87	3,95	20/4	11,25	0,90
27/12	8,00	2,30	23/2	0,75		23/4	21,25	1,05
30/12	6,75	1,30	24/2	1,30		24/4	175,00	
3/1	27,50	1,25	25/2	0,13		25/4	18,75	
5/1	287,00	0,70	26/2	12,50		26/4	1,25	0,50
6/1	45,00	1,90	27/2	0,35		7/5	3,00	1,10
7/1	38,00	2,20	28/2	1,25	1,15	12/5	2,05	7,05
8/1	0,06		2/3	7,75	1,15	13/5	4,50	4,80
9/1	0,21		4/3	22,50	2,45	15/5	6,50	3,70
12/1	0,20		6/3	3,37		21/5	8,25	0,95
13/1	1,20		10/3	5,95	2,50	25/5	70,00	1,20
14/1	0,47		11/3	10,75	3,70	7/6	10,00	
19/1	0,17	5,60	14/3	2,63		16/6	7,50	4,90
22/1	7,60		16/3	25,00	0,75	4/7	24,07	2,10
24/1	1,93		17/3	15,00	0,30	7/7	25,00	1,70
26/1	8,92	3,25	21/3	16,25	1,00	10/7	62,50	11,00
						2/8	17,50	1,60

Tab.3: Chronique des teneurs en ions chlorures dans les pluies journalières au lieu-dit " La Montagne" pendant l'année 1987.

part, un calcul similaire au précédent conduirait à des taux d'évaporation supérieurs à 70% pour des hauteurs initiales de 138 à 370mm, ce qui semble impossible.

Il est donc préférable d'expliquer ces fortes teneurs relatives par des contaminations d'origine marine; la corrélation entre teneur et hauteur pourrait trouver son origine dans le fait que les aérosols marins peuvent être un facteur de déclenchement de certaines précipitations.

Rappel: les précipitations peuvent dans certains cas être déclenchées par ensemencement : dans un air humide, audessus de l'isotherme 0 degré, et proche de la saturation, la présence d particules microscopiques active la formation de cristaux de glace. En effet l'on retrouve parfois des " germes " (poussières, cristaux de NaCl, etc...) au sein des grelons.

III.1.3.3 Conclusions.

L'examen des teneurs en ions chlorures des pluies montre que, pour la station de La Montagne, pour les trois quarts des pluies journalières les teneurs sont assez constantes formant "un bruit de fond" certainement amplifié par les imprécisions des mesures. L'évaporation n'affecte que les pluies inférieures à 20mm et ceci très rarement. Episodiquement des aérosols marins atteignent la station.

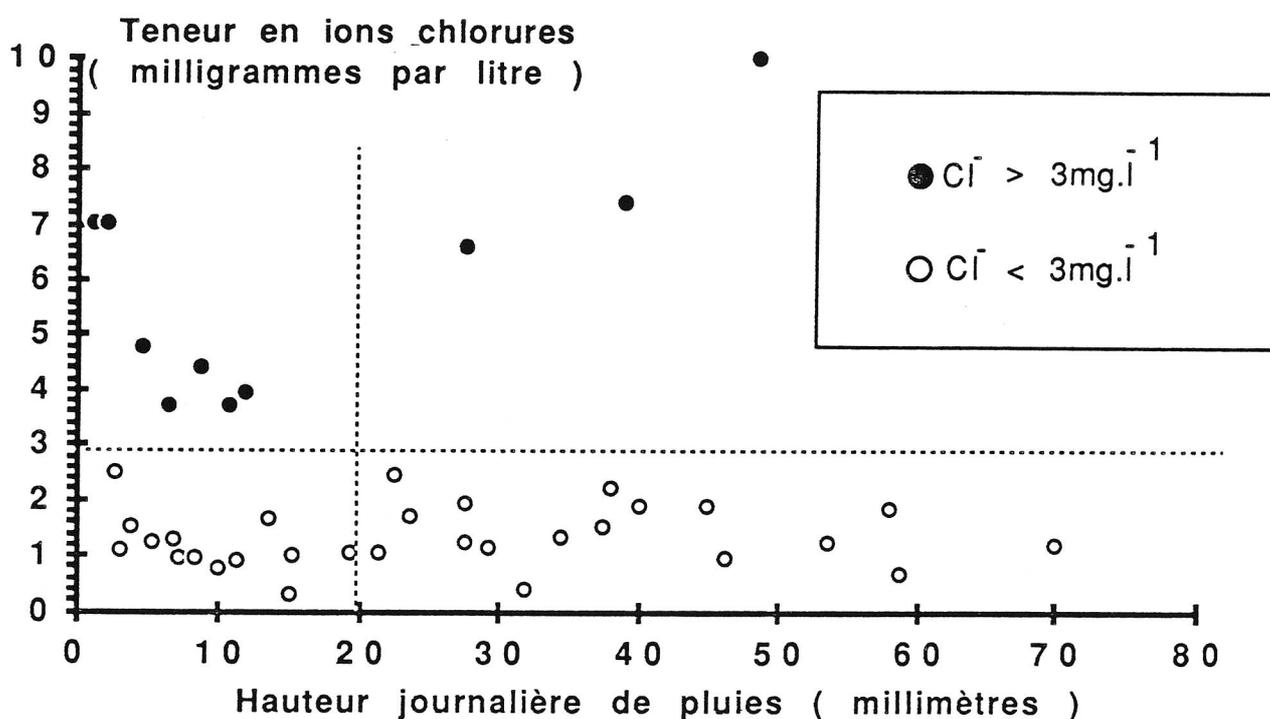


Fig.34: Relation entre teneurs en ions Cl^- (mg.l^{-1}) et hauteurs journalières des pluies (mm) pendant le cycle 1986-1987, à La Montagne.

Il apparaît que les teneurs varient très rarement de la moyenne. Pour les rares pluies inférieures à 20mm avec une teneur en Cl^- supérieure, il est possible de faire appel à un phénomène de concentration par évaporation en cours de chute. Pour les pluies enrichies en chlorures et supérieures à 20mm, il est plus raisonnable de faire appel à un phénomène de contamination par des aérosols marins.

STATIONS	Cote en mètres	HAUT. totale (mm)	T°MOY POND. °C	OX. 18 pour mille vs SMOW	DEUT. pour mille vs SMOW	HAUT. totale mm	T°MOY POND. °C	OX. 18 pour mille vs SMOW	DEUT. pour mille vs SMOW
MAKES	890	1334	19,7	-6,32	-43,9	452	13,6	-3,76	-14,1
AURERE	920	2334	20,6	-5,25	-42,7	245	16,1	-3,09	n.m.
CILAOS	1210	2886	19,5	-7,23	-51,5	323	14,2	-4,02	-17,9
G.ILET	1315	3582	18,6	-6,50	-37,6	519	16,0	-4,77	-23,3
CAMPUS	75	1064	24,2	-3,90	-37,8	260	22,7	-2,54	-9,4
COLOSSE	10	1450	24,1	-3,53	-24,5	910	21,7	-2,41	-7,3
BAGATELLE	250	2016	23,9	-3,21	n.m.	755	21,6	-2,3	n.m.
TAKAMAKA	649	4541	24,1	-4,26	-23,7	2393	21,8	-2,82	-8,6
BELOUVE	1490	3567	17,9	-5,19	-29,4	1437	15,3	-3,54	-12,4
BEAUMONT	1105	1876	18,2	-4,83	-31,4	761	15,3	-3,65	-14,1
P.MAIDO	2190	1335	12,2	-7,56	-47,0	172	10,2	-5,4	-28,7
MONTAGNE	400	1089	23,1	-4,45	-26,4	343	20,3	-2,11	n.m.
T.BASSINS	1105	1168	18,1	-6,11	-39,3	169	14,1	-5,84	-12,4
DOS D'ANN	915	1080	20,3	-5,18	-33,0	253	17,4	-4,42	n.m.
IRFA	1520	1245	17,4	-7,53	-55,0	132	11,3	-4,69	n.m.
PORT	5	366	27,3	-4,25	-38,0	114	24,1	n.m.	n.m.
ST GILLES	5	255	26,4	-4,55	-33,5	54	23,1	n.m.	n.m.
ST LEU	5	322	26,2	-4,35	n.m.	124	22,2	-2,29	n.m.
E.SALE	25	611	25,5	-4,85	-38,1	148	21,3	-2,81	-10,9
STATIONS	Cote en mètres	HAUT. totale mm	T°MOY POND. °C	OX. 18 pour mille vs SMOW	DEUT. pour mille vs SMOW	HAUT. totale mm	T°MOY POND. °C	OX. 18 pour mille vs SMOW	DEUT. pour mille vs SMOW
MAKES	890	2204	19,5	-6,48	n.m.	1786	18,2	-5,67	-36,4
AURERE	920	4214	21,1	n.m.	n.m.	2579	20,2	-5,04	n.m.
CILAOS	1210	3562	19,7	-10,64	n.m.	3209	19,0	-6,91	-48,1
G.ILET	1315	5768	20,1	n.m.	n.m.	4101	18,2	-6,28	-35,8
CAMPUS	75	2654	25,6	n.m.	n.m.	1324	23,9	-3,63	-32,2
COLOSSE	10	3492	24,5	-6,20	n.m.	2360	23,2	-3,10	-17,9
BAGATELLE	250	4119	24,2	-5,11	n.m.	2771	23,3	-2,96	n.m.
TAKAMAKA	649	6734	24,4	-6,31	n.m.	6934	23,3	-3,76	-18,5
BELOUVE	1490	6517	20,8	n.m.	n.m.	5004	17,2	-4,72	-24,5
BEAUMONT	1105	5042	18,8	-4,83	n.m.	2637	17,4	-4,49	-26,4
P.MAIDO	2190	2972	14,7	-9,28	n.m.	1507	12,0	-7,31	-44,9
MONTAGNE	400	3025	23,5	n.m.	n.m.	1432	22,4	n.m.	n.m.
T.BASSINS	1105	2816	26,7	-7,38	n.m.	1337	17,6	-6,08	-35,9
DOS D'ANN	915	3274	20,8	-8,98	n.m.	1333	19,8	-5,04	n.m.
IRFA	1520	2922	17,6	-7,50	n.m.	1377	16,8	-7,26	n.m.
PORT	5	1568	27,3	n.m.	n.m.	480	26,5	n.m.	n.m.
ST GILLES	5	1382	26,7	-7,25	n.m.	309	25,8	n.m.	n.m.
ST LEU	5	1024	26,4	-7,94	n.m.	446	25,1	-3,78	n.m.
E.SALE	25	959	25,9	-6,57	n.m.	759	24,7	-4,45	-32,8

n.m. signifie non mesuré

Tab.4: Teneurs en isotopes stables des pluies, hauteurs d'eau échantillonnées et températures moyennes pondérées par les hauteurs mensuelles des pluies sur les stations à relevé saisonnier.

III.2 ETUDE ISOTOPIQUE DES PRECIPITATIONS.

III.2.1 Rappels théoriques.

Lors des changements de phases et des réactions chimiques, les molécules contenant des isotopes lourds se distinguent par leurs comportements différents. Ce phénomène se traduit par le **fractionnement isotopique**.

III.2.1.1 Le fractionnement isotopique.

Soit A et B, deux corps, en réaction réversible, avec des rapports d'abondance en isotope i , \mathcal{R}_A^i et \mathcal{R}_B^i , on appelle **facteur de fractionnement** de l'isotope i , lorsque l'équilibre est atteint, lors de la réaction entre A et B, le rapport:

$$\alpha_{(A,B)}^i = \mathcal{R}_A^i / \mathcal{R}_B^i \quad (3)$$

Rappel: le facteur de fractionnement est donné pour l'équilibre thermodynamique, c'est à dire qu'il n'intervient plus lorsque la réaction est totale.

Par soucis de cohérence avec les unités δ ‰ et parce que le facteur de fractionnement est d'un usage difficile, on utilise le **facteur d'enrichissement**:

$$\mathcal{E}_{(A,B)}^i \text{‰} = (\alpha_{(A,B)}^i - 1) \cdot 1000 \quad (4) \text{ et lorsque } \mathcal{E}_{(A,B)}^i \text{ est petit devant 1 on admet:}$$

$$\mathcal{E}_{(A,B)}^i \approx \delta_A^i \text{‰} - \delta_B^i \text{‰} \quad \text{et} \quad \mathcal{E}_{(A,B)}^i \approx - \mathcal{E}_{(B,A)}^i \quad (5)$$

Ce facteur est thermodépendant selon une loi du type (Friedmann et O'Neil, 1977; Fritz et Fontes, 1980):

$$\mathcal{E}_{(A,B)}^i \approx \zeta + \beta \cdot T^{-1} + \gamma \cdot T^{-2} \quad (6)$$

T est la température absolue (kelvin).

ζ, β, γ sont des constantes relatives à la réaction A,B et à l'isotope i .

Dans le cas particulier du changement de phase LIQUIDE \Rightarrow VAPEUR pour l'eau:

pour ^{18}O : $\zeta=2,64$; $\beta=-3,206 \cdot 10^3$; $\gamma=1,53 \cdot 10^6$ (Bottinga & Craig, 1969);

pour ^2H : $\zeta=52,61$; $\beta=-72,248 \cdot 10^3$; $\gamma=24,48 \cdot 10^6$ (Majoube, 1971).

III.2.1.2 Comportement isotopique à la condensation

Les pluies proviennent essentiellement d'un phénomène de condensation au cours du refroidissement de masses d'air humide. Or, la condensation est un phénomène d'équilibre qui se produit lorsque la saturation en eau de l'air est atteinte.

Rappel: La saturation en eau de l'air est la teneur volumique maximale de vapeur d'eau que l'air peut contenir; ce terme est thermodépendant.

Une réserve de vapeur soumise à un refroidissement adiabatique produit, à partir de la saturation, à la température T, des gouttelettes de composition isotopique:

$$\delta_L^T \text{‰} \approx \delta_V^T \text{‰} + \epsilon_{(V,L)}^T \quad (7)$$

avec

$\delta_L^T \text{‰}$ = la composition isotopique de la phase liquide à la température T

$\delta_V^T \text{‰}$ = la composition isotopique de la phase vapeur à la température T

$\epsilon_{(V,L)}^T$ = le facteur de fractionnement de la transformation vapeur \leftrightarrow liquide à la température T

Du fait de la conservation de la masse globale d'isotope, la composition isotopique du condensat va évoluer au cours du refroidissement par rapport au logarithme de la proportion d'eau qui a changé de phase, c'est une distillation de Rayleigh (Fontes, 1976). Deux effets sont en compétition :

- plus la température est faible plus le facteur de fractionnement est fort,
- plus la température est faible et plus la proportion d'eau condensée est forte, plus la teneur en isotope lourds du condensat s'approche de celle de la teneur initiale.

Le facteur dominant est ici la température puisque les calculs menés par les auteurs (Dansgaard, 1964) aboutissent à un gradient d'enrichissement pour ^{18}O , de $0,7\text{‰} \cdot \text{°C}^{-1}$, pour une condensation débutant à 20°C . Les deux espèces isotopiques de l'eau suivent des lois linéaires similaires vis-à-vis de la température lors des phénomènes de condensation; "il est donc normal que les teneurs en ces deux isotopes lourds dans les précipitations soient elles-mêmes fonction l'une de l'autre, au premier degré "(Fontes, 1976). La relation liant les teneurs en ^{18}O et ^2H dans les précipitations n'ayant pas subi d'évaporation est du type (Craig, 1961b):

$$\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + d \quad (8)$$

où d est appelé excès en deutérium.

Le paramètre d est pour les stations soumises à un régime de précipitation océanique simple de +10 ‰, mais il est supérieur pour des précipitations alimentées par une évaporation continentale (ou une mer fermée) par exemple en domaine méditerranéen oriental, il est de +22 ‰ (Nir, 1967).

III.2.1.3 Comportement isotopique à l'évaporation.

L'évaporation est un phénomène hors d'équilibre provoqué par une humidité absolue de l'air inférieure à l'humidité saturante. Le fractionnement dû au changement de phase est perturbé par des effets cinétiques et des échanges isotopiques avec la vapeur atmosphérique (Craig *et al*, 1963).

Rappel: Deux composés différents comportant le même élément peuvent sans intervention apparente d'une réaction chimique "échanger" leurs espèces isotopiques, cette capacité d'échange dépend des composés en présence, des températures, des différences de composition.

Pour l'évaporation très rapide d'une réserve d'eau le processus s'apparente à une distillation de Rayleigh, alors que pour des évaporations plus "douces" l'appauvrissement de la vapeur est très vite limité par l'échange (Fontes, 1976).

Quoi qu'il en soit, les teneurs en ^{18}O et ^2H évoluent toujours sur une droite mais avec une pente inférieure à 8 et une ordonnée à l'origine inférieure à 10.

$$\delta^2\text{H} = a * \delta^{18}\text{O} + b \quad (9)$$

avec $8 < a < 3$

et $b \ll 10$, dans le cas des eaux continentales.

En ce qui concerne les pluies, on conçoit aisément que lors de leur chute dans une atmosphère désaturée, les gouttelettes puissent subir une évaporation et/ou un échange avec l'humidité de l'air. Si cela est le cas les pentes $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ seront affectées.

III.2.1.4 Variations de la composition isotopique des pluies.

III.2.1.4.1 L'effet de la température.

III.2.1.4.1.1 Teneurs annuelles.

Les teneurs moyennes annuelles en ^{18}O et ^2H des précipitations des stations des hautes et moyennes latitudes présentent souvent une relation linéaire significative avec les températures au sol.

La droite de régression a pour équation (pour ^{18}O) (Dansgaard, 1964)

$$\delta^{18}\text{O} = 0,69 * t^{\circ}\text{C} - 13,6 \quad (10)$$

Remarque: l'on retrouve dans cette relation empirique, une pente très proche du gradient d'évolution théorique donné par la thermodépendance du fractionnement isotopique (cf. II.1.2).

III.2.1.4.1.2 Effet saisonnier.

Pour une même station, à l'échelle mensuelle, l'évolution de la composition isotopique suit souvent celles des températures mensuelles et des gradients locaux peuvent être déduits (AIEA, 1981), par exemple, dans le Chablais (Blavoux, 1978) :

$$\delta^{18}\text{O} = 0,4 \cdot t^{\circ}\text{C} - 13,6 \quad (11)$$

III.2.1.4.1.3 Effet d'altitude.

L'augmentation de l'altitude se traduit généralement par un abaissement de la température. Les teneurs suivent cette décroissance avec des gradients locaux de $-0,13$ à $-0,5$ $\delta^{18}\text{O}$ par 100 m selon les régions climatiques (Fontes, 1980) (Tab.5).

III.2.1.4.2 Effet de masse.

La plupart des îles et stations côtières tropicales et équatoriales présentent des valeurs plus appauvries que ne laissent présager leur température annuelle, de plus les teneurs diminuent avec les hauteurs de précipitations (Fig.35). Il s'agirait ici de l'influence du **type de précipitation**, qui est, dans ces régions, le fait de nuages à très fort développement vertical et à ascendance brutale (Yurtsever & Gat, 1981).

Remarque: Il est possible que l'appauvrissement en isotopes lourds observé dans les précipitations générées par des nuages à forts développements verticaux, soit tout simplement l'effet d'une altitude de condensation beaucoup plus élevée (et d'une température beaucoup plus basse). La hauteur d'eau précipitée serait l'indice de la brutalité de l'ascendance, de l'altitude de condensation, donc de la température de condensation. Il est donc possible que l'effet de masse ne soit qu'un dérivé de l'effet de température, même si dans le détail des considérations cinétiques compliquent le schéma.

III.2.1.4.3 Effet de continentalité.

Les teneurs en isotopes stables sont généralement plus faibles à l'intérieur des continents (IAEA, 1986) que sur les côtes. Les hypothèses pour expliquer ce phénomène sont, d'une part un épuisement du stock nuageux initial de vapeur marine au dessus des continents, d'autre part le fait que les nuages se réalimentent par ascendance d'une vapeur d'origine continentale appauvrie en isotopes lourds par rapport à l'air marin.

Pays	Région	Δ altitude (mètres)	Δ ¹⁸ O par 100m	Δ temps d'étude	Auteur(s) de l'étude
CLIMATS TEMPERES					
France	Chablais	545	0,32	3 ans 1 mois	Blavoux (1977)
	Chablais	415	0,27	1 ans 6 mois	
	Mont-Dore	710	0,15*	6 mois	Jacob & Blavoux(in.)
	Mont Blanc	1700	0,50**	chute de Neige	Moser <i>et al.</i> (1970)
	Pyrénées	595	0,30*	1 an	Blavoux <i>et al.</i> (1973)
	Pyrénées	630	0,29	6 mois	Eberentz (1975)
	Pyrénées	400	0,18	11 mois	Puyoo (1976)
Suisse	Aar	470	0,37	1 an	Siegenthaler
	Jura	491	0,20	1 an	<i>et al.</i> (1970)
Autriche	Insbruck	1680	0,20	2 mois	Ambachet <i>al.</i> (1968)
	Tyrol	2000	0,50**	chute de neige	Moser <i>et al.</i> (1970)
RDA	Allemagne	625	0,37**	?	Eichler (1965)
	Centrale		0,25***		
Tchecoslovaquie		380	0,28	6 mois	Dinçer <i>et al.</i> (1970)
Moyennes		818	0,29		
CLIMATS MEDITERRANEENS					
Italie(Latium)	Tyrrhénienne	1450	0,34	9 mois	Fontes et Zuppi (1974)
	Adriatique	1450	0,28	9 mois	
Grèce	Sperkhios	1885	0,16*(0,28 pond.)	1 an	Stahl <i>et al.</i> (1974)
Moyennes		1595	0,26		
CLIMATS INTER-TROPICAUX					
Cameroun	Mt Cameroun	4050	0,16	2 ans	Fontes <i>et al.</i> (1976)
Tanzanie	Kilimandjaro	1100	0,30**	chute de neige	<i>in Moser et al.</i> (1970)
Algérie	Hoggar	1324	0,24	1 jour	Conrad <i>et al.</i> (1970)
Martinique	Mont. Pelée	600	0,13	1 an	Cayol, Blavoux (in.)
Nicaragua	Pacifique	1675	0,26	1 an	Payne <i>et al.</i> (1974)
Argentine	Andes	390	0,30*		Vogel <i>et al.</i> (1975)
	Rio Abaucan		0,35*		
Chili	Andes (ouest)	4500	0,32**		Fontes <i>et al.</i> (1975)
			0,26		
Moyennes		1950	0,26		Moser <i>et al.</i> (1973)

* d'après les teneurs des sources

** d'après les gradients en deutérium

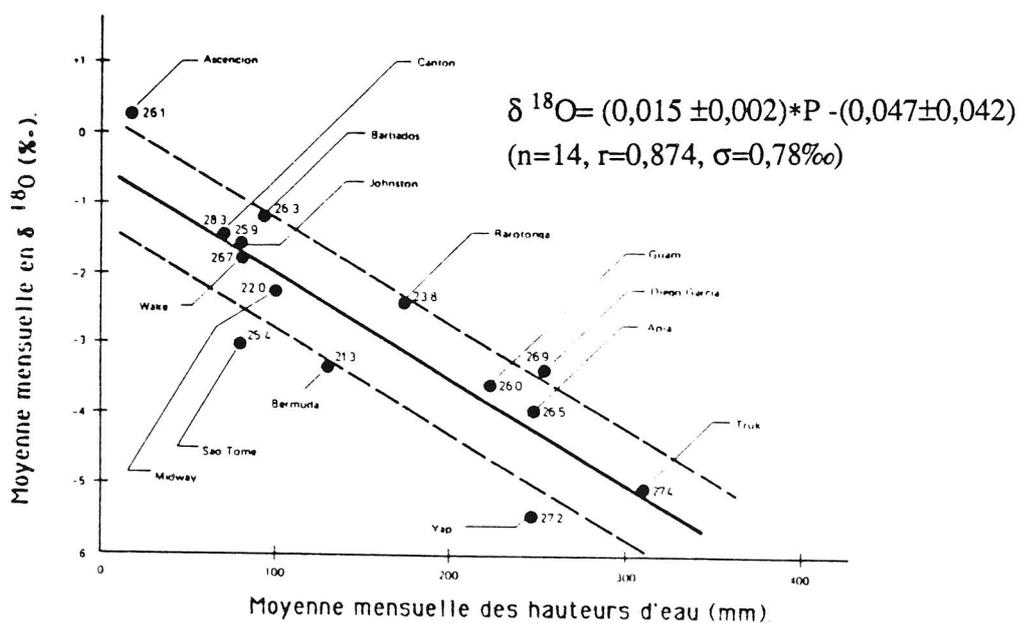
Tab.5: Quelques valeurs de gradients altitudinaux en isotopes stables dans le monde (*in* Blavoux, 1978).

Fig.35: Mise en évidence de "l'effet de masse" sur quelques stations insulaires intertropicales à forte pluviosité (A.I.E.A., 1981).

Fig.36: Esquisse des isoteneurs en ^{18}O des pluies de la saison cyclonique 1985-1986 (%o vs SMOW).

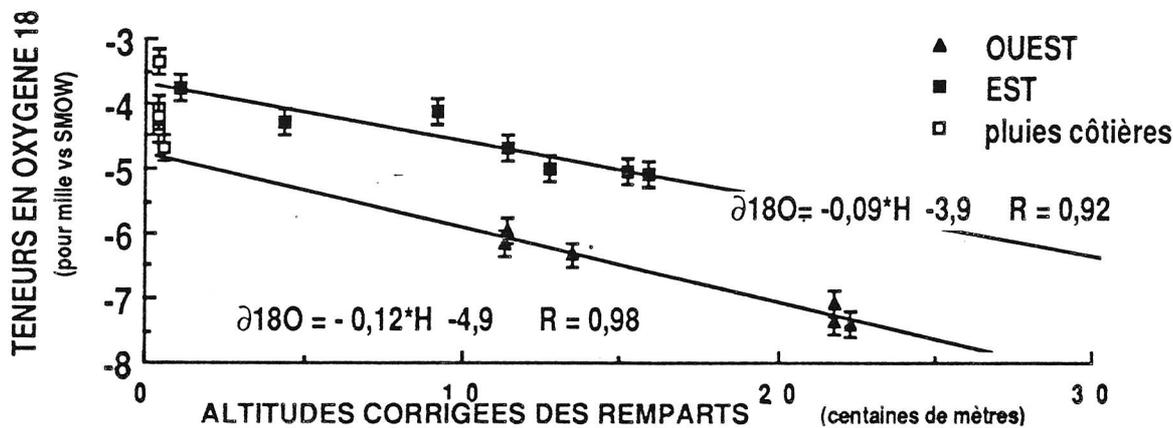
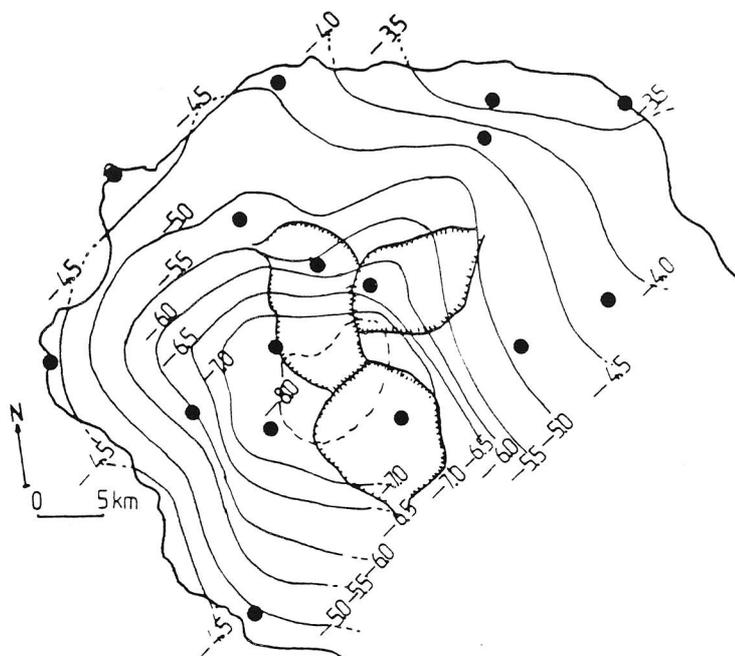


Fig.37: Calcul des gradients altitudinaux en ^{18}O lors de la saison cyclonique 1985-1986. Les gradients sont très faibles aussi bien sur la côte ouest que sur la côte est. La différence entre les ordonnées à l'origine des deux droites montre bien l'effet écran de l'île vis-à-vis des vents dominants. La "correction des altitudes" se fait selon les modalités décrites au § III.2.2.1.2.

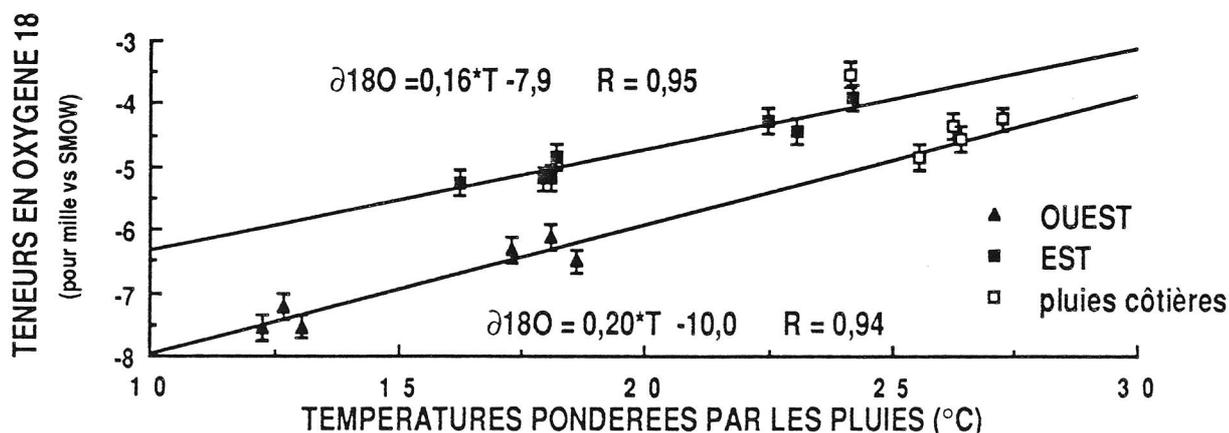


Fig.38: Calcul des gradients thermométriques en ^{18}O lors de la saison cyclonique 1985-1986. Les gradients thermométriques reflètent bien les gradients altitudinaux avec un gradient de température de $0,55^{\circ}C$ par 100 mètres. La "pondération" se fait à l'échelle mensuelle.

III.2.2 Répartition spatiale des teneurs isotopiques des pluies en ^{18}O .

Les analyses isotopiques des pluies sont consignées dans le tableau 4.

III.2.2.1 Saison cyclonique 1985-86

III.2.2.1.1 Carte des teneurs (Fig. 36).

Les courbes d'isoteneurs montrent une répartition assez simple des teneurs en ^{18}O :

- les teneurs s'appauvrissent des côtes vers l'intérieur de 4 ‰,
- les teneurs montrent une différence entre les côtes ouest et est de 1 ‰,
- le contour des courbes ne tient aucun compte des limites orographiques très importantes que constituent les remparts des cirques.

Remarque : ce dernier point peu est attribué au fait que les nuages générateurs de pluies ne descendent pas à l'intérieur des cirques. Les altitudes de condensations des pluies des cirques ne sont donc pas inférieures à celles des pentes externes

III.2.2.1.2 Gradients altitudinaux des teneurs.

Il a été choisi, d'après ce qui précède, d'associer aux stations encaissées les altitudes des remparts qui les dominent. Les modifications sont les suivantes :

Stations	Altitudes (mètres)	Altitudes modifiées (mètres)	Dénomination du rempart (carte au 1/25 000)
Cilaos	1210	2189	Coteau Kerveguen
Aurère	980	1552	Col du Bélier
Takamaka	649	880	Rempart des Marsouins
I.R.F.A.	1520	2140	Col du Maïdo
Makes	890	1100	Rempart du cirque
Dos d'Ane	910	1239	Roche Verre Bouteille

Les stations peuvent alors selon leur localisation géographique se regrouper selon deux tendances (Fig. 37). Sur le versant est, le gradient altitudinal est de -0,09 ‰ par 100m, alors que sur le versant ouest, il est de -0,12 ‰ par 100 m. Ces gradients très faibles sont proches de ceux trouvés dans l'atmosphère saturée en humidité du Mont Cameroun (-0,16 ‰.100m⁻¹) (Fontes et Olivry, 1977).

Fig.39: Esquisse des isoteneurs en ^{18}O des pluies de la saison sèche 1986 (‰ vs SMOW).

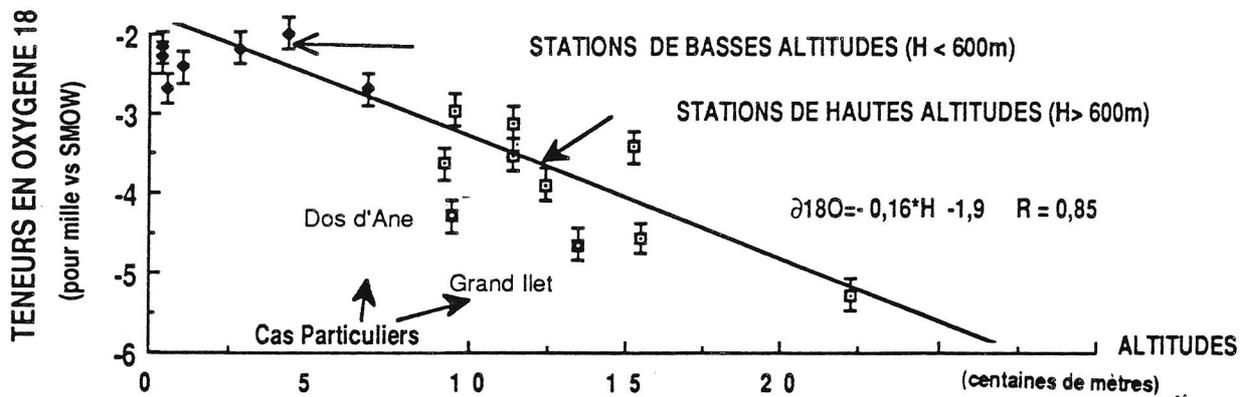
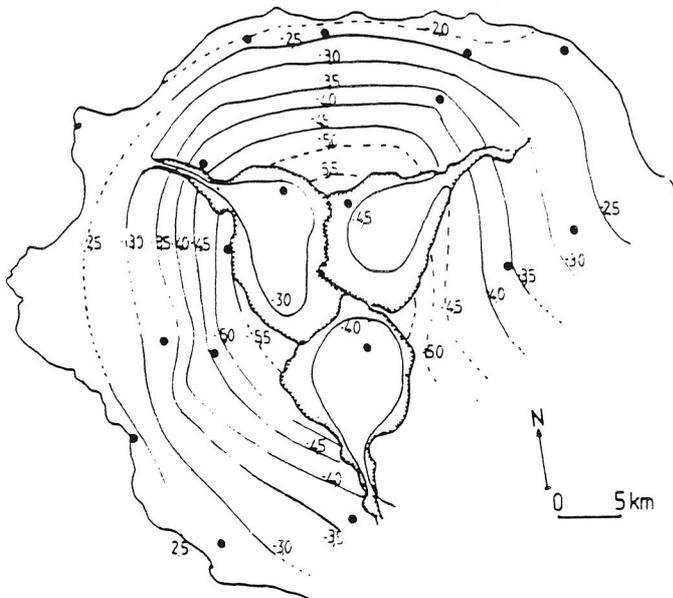
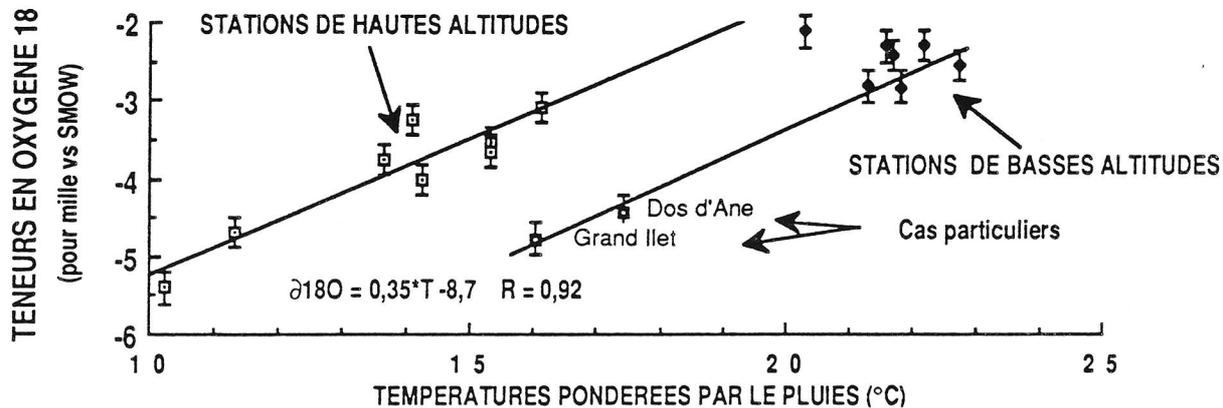


Fig.40 & 41: Calcul du gradient d'altitude et du gradient thermométrique en ^{18}O des pluies de la saison sèche 1986. Les gradients ne sont définis que pour les stations d'altitude supérieure à 600m. Les deux points situés dans des cirques présentent des teneurs appauvries par rapport à leurs altitude et température.



III.2.2.1.3 Gradients thermométriques.

De même que l'on a corrigé les altitudes, il est logique de corriger les températures. La correction effectuée est de 0,7°C par 100 m pour les stations suivantes:

Stations	Température (°C)	Température corrigée (°C)
Cilaos	19,48	12,63
Aurère	20,64	16,22
Takamaka	24,13	22,48
IRFA	17,37	13,03
Makes	19,70	17,26
Dos d'Ane	20,34	18,04

Deux gradients thermiques apparaissent séparant très distinctement l'île (Fig.38):

- à l'Est le gradient est de 0,16 ‰°C⁻¹;
- à l'Ouest le gradient est de 0,20 ‰°C⁻¹;

La différence entre les gradients reflète le fait que les stations de l'Ouest sont protégées, des pluies venant de l'Est, par la masse du massif.

III.2.2.2 Saison sèche 1986.

III.2.2.2.1 Carte des teneurs.

Les courbes d'isoteneurs (Fig.39) montrent une répartition assez simple sur les pentes externes, mais perturbée dans les cirques .

Les teneurs s'appauvrissent des côtes vers l'intérieur, l' écart maximum étant de 3,7 ‰. Il n'y a pas de différence significative de teneurs entre la côte ouest et la côte est.

III.2.2.2.2 Gradients d'altitudes.(Fig.40)

La décroissance des teneurs en ¹⁸O est de -0,16 ‰ par 100 m pour les stations d'altitude supérieures à 600m mais avec une corrélation moindre que pour la saison cyclonique .

III.2.2.2.3 Gradients thermométriques. (Fig.41)

Pour des altitudes supérieures à 600m, les teneurs obéissent à un gradient thermométrique de 0,35 ‰°C⁻¹. Les stations côtières et celles de Dos d'Ane et de Grand Ilet semblent appauvries par rapport à cette tendance.

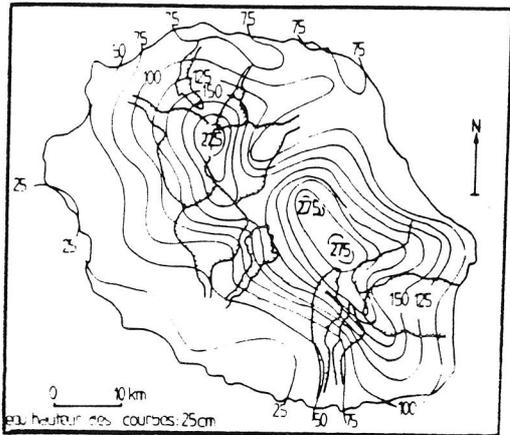


Fig.42: Isohyètes des précipitations pendant les trois premiers jours de passage de la perturbation tropicale Clotilda (les hauteurs sont en cm). Les hauteurs relevées en trois jours, sont du même ordre que celle observées pendant de la dépression Hyacinthe, 6 ans auparavant... Les dégats sont : 250 maisons endommagées (120 détruites), 150 000 personnes privées d'eau, 40 000 personnes privées d'électricité, 10 000 personnes privées de téléphone.



Fig.43: Image radar de la dépression tropicale Clotilda arrivant sur la Réunion. Le faisceau radar coupe en oblique la masse nuageuse et ne rend compte que d'une infime partie du phénomène (+ de 200km de rayon). Néanmoins "l'oeil" est bien visible.

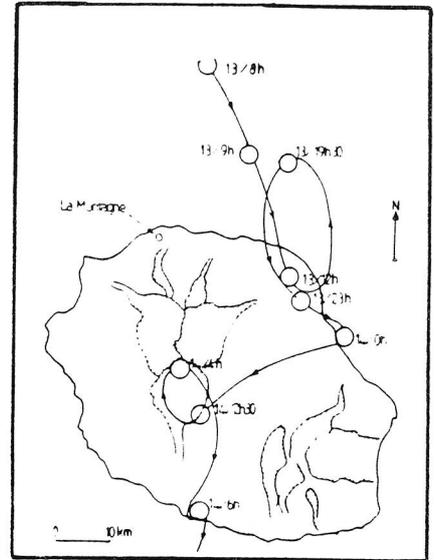


Fig.44: Trajet du centre de la dépression Clotilda sur l'île de la Réunion le 13 et le 14 février 1987. La dépression a un trajet aléatoire, imprévisible. Lors de sa boucle sur le cirque de Cilaos, les températures au sol augmentent de 7°C.

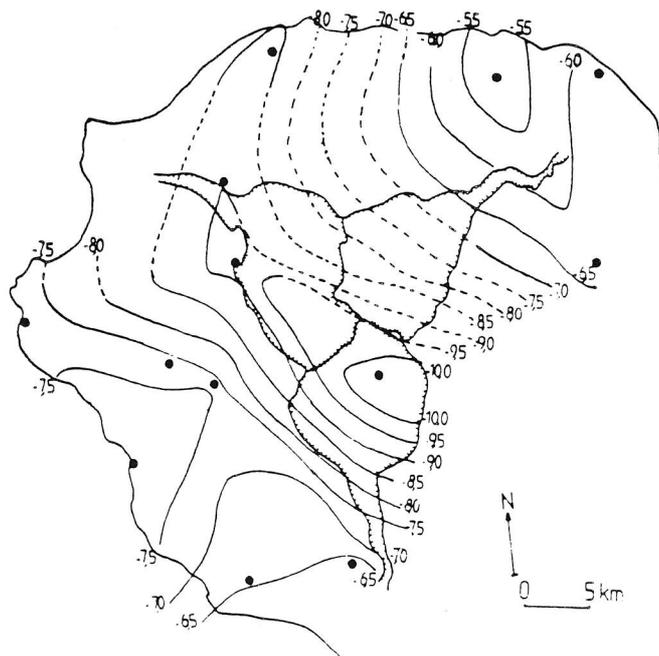


Fig.45: Esquisse des isoteneurs en ^{18}O des pluies de la saison cyclonique 1986-1987 (Clotilda) (‰ vs SMOW).

La carte montre des teneurs très différentes de la saison cyclonique 1985-1986, appauvries de 0,5 à 3,5‰. Les teneurs ne dépendent plus de gradients altitudinaux, mais plutôt de la proportion des pluies de Clotilda dans l'échantillonnage.

III.2.2.3 Saison cyclonique 1986-1987.

III.2.2.3.1 Carte des teneurs.

La saison cyclonique est fortement marquée du point de vue des hauteurs d'eau tombées par le passage de la dépression cyclonique Clotilda les 13 et 14 février 1987. Les 11, 12, 13 février, il pleut considérablement sur toute l'île (Fig.42) (les hauteurs atteignent 2,75m en 72h). "L'oeil" de la dépression suivi par radar survole l'île (Fig.43, 44) sur le côté est, pour rester bloqué sur le cirque de Cilaos pendant 3h.

Du fait des vents violents, plusieurs pluviototalisateurs ont été endommagés (renversements ou entonnoirs arrachés...), et donc peu de mesures sont disponibles.

L'esquisse de la carte des teneurs (Fig.45) montre une répartition isotopique considérablement modifiée par rapport à la saison cyclonique précédente; il n'y a plus à proprement parler de gradients altitudinaux, mais plutôt un **gradient de participation des pluies cycloniques à l'échantillonnage**. La carte des teneurs en ^{18}O montre des précipitations appauvries de généralement 3 ‰.

III.2.2.4 Conclusions sur la répartition spatiale des teneurs.

Les gradients altimétriques sont très faibles quels que soient la saison et le lieu, et varient peu (de -0,09 à -0,16 ‰ par 100 m) en situation normale.

Les gradients thermométriques représentent mieux les variations de teneurs, mais ont une répartition déterminés par des profils thermiques atmosphériques probablement complexes. Pendant la saison sèche les gradients s'approchent des valeurs observées dans l'hémisphère nord autour de 0,3-0,4 ‰.°C⁻¹ (Fontes,1976 ;Blavoux,1978). Pendant la saison humide, avec l'apparition des nuages à très forte ascendance verticale, les gradients sont plus faibles de l'ordre de 0,16 à 0,20 ‰.°C⁻¹.

Lors d'une saison humide comprenant effectivement une forte perturbation tropicale, les teneurs sont appauvries et les gradients deviennent dépendants de l'importance relative des pluies cycloniques.

mois de l'année	^{18}O pour mille vs SMOW	hauteurs mensuelles (mm)
décembre	-3,09	157
janvier	-8,65	972
février	-10,50	1359
mars	-2,93	100
avril	-5,65	367
mai	-3,58	114
juin	-1,57	166
juillet	-2,99	83
août	-0,45	43
septembre	-1,63	155

Tab.6: Chronique mensuelle des teneurs en ^{18}O des précipitations à La Montagne (1986-1987).

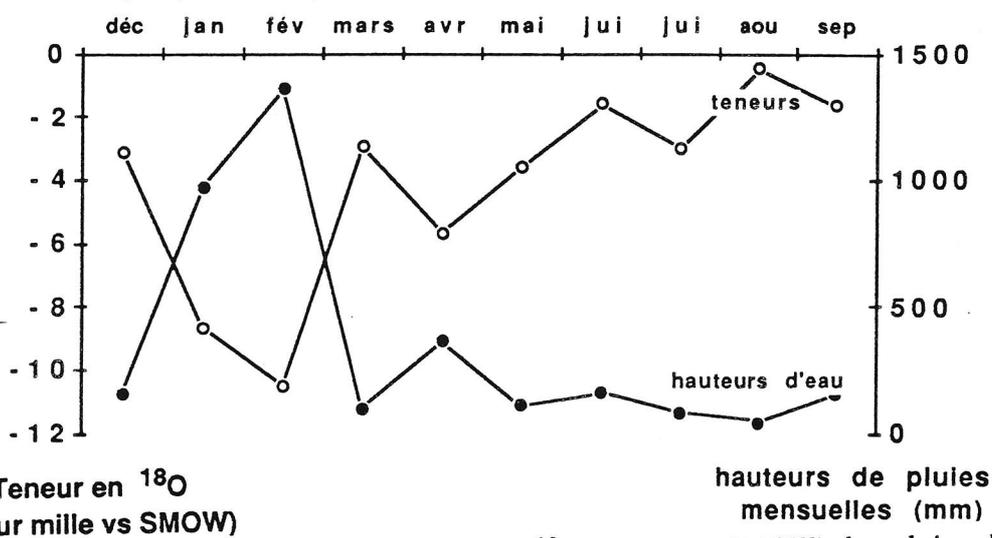


Fig.46: Chronique mensuelle des teneurs en ^{18}O (en ‰ vs SMOW) des pluies du cycle hydrologique 1986-1987 à la station de La Montagne et hauteurs des pluies mensuelles en mm. Les teneurs sont très appauvries pendant la saison cyclonique, et très enrichies pendant la saison sèche, l'écart maximum étant de 8 ‰ vs SMOW. L'effet prédominant est l'effet de masse puisque l'effet évaporatoire est réduit.

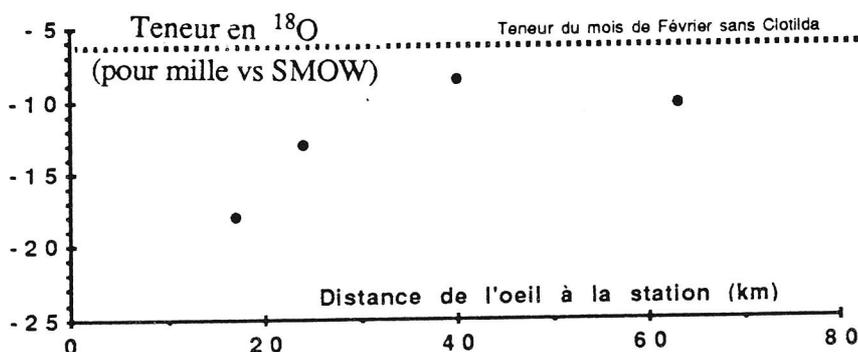


Fig.47: Teneurs instantanées en ^{18}O (en ‰ vs SMOW) des pluies lors du passage de la perturbation tropicale, en fonction de la distance de l'oeil à la station. Les prélèvements sont instantanés (5mn) et sont opérés à des maxima subjectifs d'intensité (bruit de la pluie sur de la tôle ondulée). Ces valeurs sont différentes de celles de l'échantillonnage moyenné avec un pas de temps de 2H où les teneurs sont stables (Nicolini et al., 1988).

III.2.3 Etude des variations saisonnières de teneurs en ^{18}O .

III.2.3.1 Chronique mensuelle.

Les pluies mensuelles de La Montagne (Tab.6) montrent une variation importante des teneurs en ^{18}O au cours de l'année hydrologique 1986-1987. La chronique des teneurs montre une forme classique des pays à climat tropical à saisons contrastées (Nicolini, 1980; Eberschweiller, 1986). Pendant la saison humide et chaude les teneurs sont appauvries alors que pendant l'hiver austral les pluies sont enrichies. La chronique (Fig.46) montre que les teneurs sont comprises entre $-10,8\text{‰}$ et $-1,0\text{‰}$. L'effet qui semble ici dominant, au moins pendant la saison humide, est l'effet de masse. L'appauvrissement est maximum pour les précipitations exceptionnelles causées par les perturbations tropicales. Lors du passage de la forte perturbation tropicale Clotilda sur la Réunion, des prélèvements instantanés ont été effectués aux maxima subjectifs d'intensités (bruit de la pluie sur la tôle ondulée...) (Fig.47). L'analyse des quatre prélèvements montrent que les pluies semblent de plus en plus appauvries lorsque "l'oeil" de la perturbation se rapproche. Néanmoins ces prélèvements sont peu représentatifs puisque une autre série de prélèvements avec un pas de 2h montre une relative constance des teneurs en ^{18}O autour de -13‰ (Nicolini, com. pers.).

III.2.3.2 Quantification de l'effet de "masse".

Sur la chronique mensuelle, les teneurs semblent évoluer avec les hauteurs d'eau mensuelles selon une loi logarithmique du type (Fig.48):

$$\delta^{18}\text{O} = a \cdot \log_{10}(H) + b \quad (10)$$

avec: H la hauteur d'eau mensuelle, a et b constantes de calage, A La Montagne $a = -5,63$ et $b = 8,8$ avec $R = 0,97$

Si l'on cherche à retrouver cet effet de masse dans l'échantillonnage saisonnier, il faut définir un indice qui traduise au mieux l'influence des hauteurs d'eau moyennes sur les teneurs. Soit une station où les teneurs suivent une loi similaire à celle observée à la Montagne. La teneur moyenne sur plusieurs mois sera :

$$\delta^T = \frac{\sum [H_i + [a \cdot \log_{10}(H_i) + b]]}{\sum [H_i]} \quad (11)$$

ce qui peut s'écrire:

$$\delta^T = a \cdot \left(\frac{\sum [H_i \cdot \log_{10}(H_i)]}{\sum [H_i]} \right) + b \quad (12)$$

δ^T est la teneur moyenne sur les mois i, H_i est la hauteur de pluie du mois i en mm

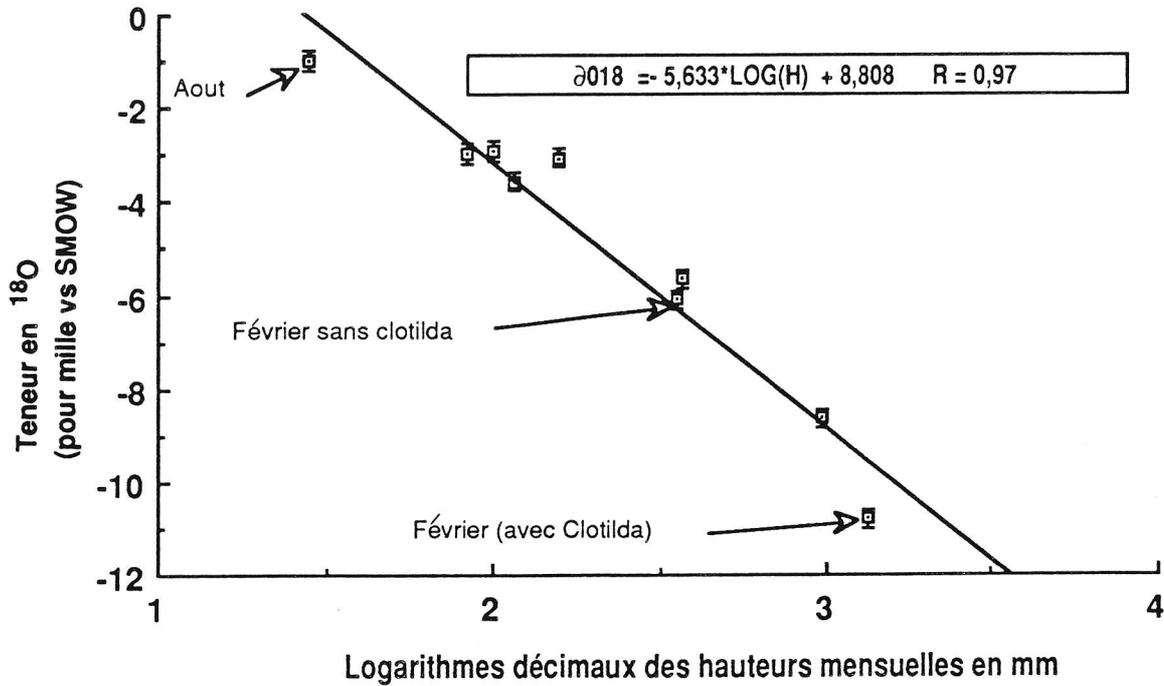


Fig.48: Relation entre le logarithme des hauteurs d'eau mensuelles et les teneurs en ^{18}O des pluies du cycle 1986-1987. Les pluies si l'on excepte, celle du mois de mars, semblent liées aux logarithmes des hauteurs d'eau.

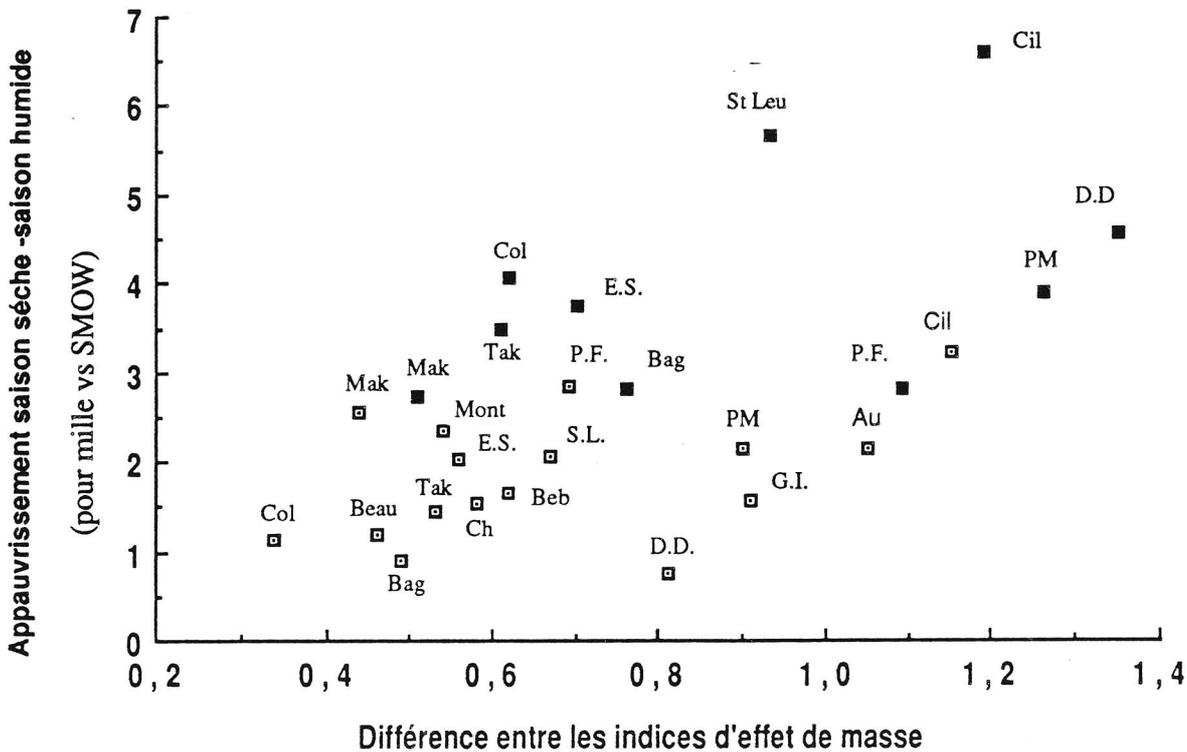


Fig.49: Relations entre les différences des indices d'effet de masse et des teneurs en ^{18}O dans les pluies. Carrés blancs : différences entre saison sèche 1986 et saison cyclonique 1985-1986. Carrés sombres: différences entre saison sèche 1986 et saison cyclonique 1986-1987.

PM=Piton Maido, DD=Dos d'Ane, PF=Petite France, GI=Grand Ilet, Cil=Cilaos, Au=Aurère, Mont=Montagne, Beb=Bébourg, Bag=Bagatelle, Tak=Takamaka, Mak=Makes, Col=Colosse, ES=Etang salé, SL=St Leu, Beau=Beaumont.

C'est pourquoi on choisit comme indice de l'effet de masse (IEM), le terme en gras de l'équation précédente, qui n'est autre que la moyenne pondérée par les hauteurs mensuelles du logarithme des hauteurs mensuelles.

Cet indice est calculé pour toutes les stations à l'aide des mesures mensuelles qui sont disponibles. Les IEM de la saison sèche 1986 sont compris entre **1,39** et **2,5** (en mm) et recourent certaines des valeurs calculées pour la saison cyclonique 1985-86, et qui varient entre **2,06** et **3,03**. Le recouplement des valeurs nous conduit donc à étudier les stations **par différence** entre la saison sèche 1986 et les saisons cycloniques 1985-86 et 1987-88.

Les différences de teneurs en ^{18}O et les différences entre les indices sont reportées sur un diagramme (Fig.49, Tab.7).

Le dépouillement du diagramme en tendances linéaires (fig.50) est favorisé par la présence d'un groupe particulier de stations à la droite de la figure qui sont des stations d'altitude supérieure à 900 m (groupe 2). La même tendance est trouvée dans les stations du groupe 3 qui sont des stations inférieures de basse altitude (< 900 m) et plutôt du versant est. Le groupe 1 comporte les stations à comportement intermédiaire.

Les pentes définies sont très voisines entre **6,3** et **6,8** ce qui est légèrement supérieur à la valeur observée à La Montagne (5,6).

Pour un effet de masse nul ($\Delta^{18}\text{O} = 0$) les différences d'indice sont de **0,65** pour le groupe 2, de **0,29** pour le groupe 1, de **0,05** pour le groupe 3.

Ceci peut être traduit en terme de hauteurs par: " l'effet de masse est sensible sur l'échantillonnage saisonnier lorsque les hauteurs mensuelles atteignent plus "de:

1,12 fois les hauteurs de la saison sèche pour le groupe 3,

1,94 fois les hauteurs de la saison sèche pour le groupe 1,

4,46 fois les hauteurs de la saison sèche pour le groupe 2.

Ces considérations recourent l'analyse de la typologie des pluies (Robert, 1985) puisque les stations, qui montrent des ordonnées à l'origine supérieures, sont celles qui bénéficient toute l'année de précipitations causées par les alizés : **l'excédent de pluie de la saison cyclonique est assuré uniquement par les perturbations tropicales**. Au contraire, les stations qui montrent des ordonnées à l'origine inférieures, sont des stations où **l'excédent de pluie de la saison cyclonique se traduit par une augmentation corrélée des pluies d'alizés et des pluies des perturbations tropicales**.

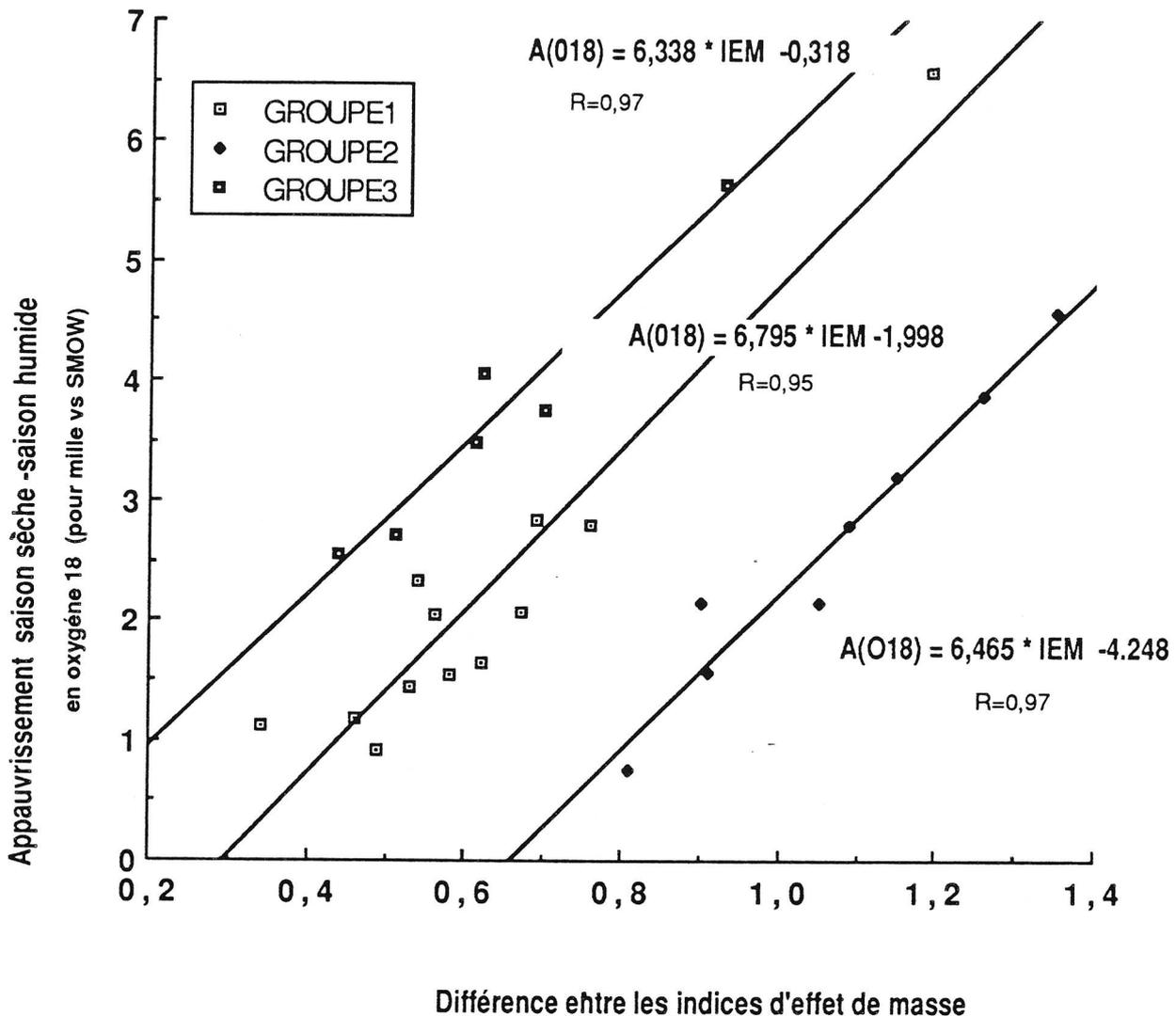


Fig.50: Relations entre les différences, des indices d'effet de masse et des teneurs en ^{18}O dans les pluies.

Trois groupes se distinguent nettement avec des pentes similaires, mais des ordonnées à l'origine différentes :

- le groupe 2 correspond à des stations dont l'excédent de pluie en saison cyclonique se traduit par une augmentation corrélée des " pluies d'alizés", et des pluies des perturbations tropicales;
- le groupe 3 correspond à des stations dont l'excédent de pluie en saison cyclonique est uniquement le fait des perturbations tropicales;
- Le groupe 1 est intermédiaire.

	Indice d'effet de masse log(mm)	Température "pondérée" par les pluies (°C)	Teneur en oxygène 18 pour mille vs SMOW	Teneur ramenée à 20°C par le gradient de saison sèche
SAISON CYCLONIQUE 1985-86				
CHAUDRON	2,34	24,2	-3,90	-5,34
MONTAGNE	2,39	23,1	-4,45	-5,52
BEAUMONT	2,60	18,2	-4,83	-4,20
P.FRANCE	2,46	18,1	-7,53	-6,87
P.MAIDO	2,49	12,2	-7,56	-4,85
ST LEU	2,06	26,2	-4,35	-6,52
PL MAKES	2,50	19,7	-6,32	-6,22
ET. SALE	2,12	25,5	-4,85	-6,77
BAGATELLE	2,64	23,9	-3,21	-4,57
COLOSSE	2,53	24,1	-3,53	-4,95
CASABOIS	2,99	18,6	-6,50	-6,00
BEMBOURG	2,98	20,7	-5,19	-5,42
TAKAMAKA	3,03	24,1	-4,26	-5,70
DOS D'ANE	2,42	20,3	-5,18	-5,30
AURERE	2,88	20,6	-5,25	-5,47
CILAOS	2,94	19,5	-7,23	-7,05
SAISON SECHE 1986				
CHAUDRON	1,76	22,7	-2,54	-3,48
MONTAGNE	1,85	20,3	-2,11	-2,21
BEAUMONT	2,14	15,3	-3,65	-2,02
P.FRANCE	1,77	14,1	-4,69	-2,63
P.MAIDO	1,59	10,2	-5,40	-2,01
ST LEU	1,39	22,2	-2,29	-3,05
PL MAKES	2,06	13,6	-3,76	-1,55
ET. SALE	1,56	21,3	-2,81	-3,25
BAGATELLE	2,15	21,6	-2,30	-2,84
COLOSSE	2,19	21,7	-2,41	-2,99
CASABOIS	2,08	16,0	-4,77	-3,40
BEMBOURG	2,36	17,4	-3,54	-2,63
TAKAMAKA	2,50	21,8	-2,82	-3,45
DOS D'ANE	1,61	17,4	-4,42	-3,53
AURERE	1,83	16,1	-3,09	-1,74
CILAOS	1,79	14,2	-4,02	-2,02
SAISON CYCLONIQUE 1986-87				
BEAUMONT	3,02	18,8	-4,83	-4,40
P.FRANCE	2,86	17,6	-7,50	-6,68
P.MAIDO	2,85	14,7	-9,28	-7,44
ST LEU	2,32	26,4	-7,94	-10,17
PL MAKES	2,57	19,5	-6,48	-6,31
ET. SALE	2,26	25,9	-6,57	-8,60
BAGATELLE	2,91	24,2	-5,11	-6,57
COLOSSE	2,81	24,5	-6,20	-7,74
TAKAMAKA	3,11	24,4	-6,31	-7,83
DOS D'ANE	2,96	20,8	-8,98	-9,26
CILAOS	2,98	19,7	-10,60	-10,51

Tab.7: Recherche de l'effet masse sur l'échantillonnage saisonnier.

III.2.4 Etude de la relation entre ^{18}O et ^2H dans les pluies.

Le report des points issus des mesures sur l'échantillonnage saisonnier (Tab.5) dans un diagramme ^{18}O vs ^2H montre (Fig.51) que les stations côtières se différencient nettement des autres par des enrichissements relatifs en ^{18}O plus forts. Ceci est très certainement dû à un phénomène d'évaporation en cours de chute des gouttelettes de pluies, en saison sèche comme en saison humide. Ce phénomène est très certainement gouverné par l'altitude relative de la base des nuages par rapport à celle des stations, et l'intensité des pluies (à moins que l'échantillonnage puisse être mis en cause). Ces points ne seront donc pas considérés dans l'établissement des droites de corrélations.

Pour les stations non côtières de saison sèche (Fig.52), on obtient une droite avec un coefficient de corrélation égal à 0,99.

$$\delta^2\text{H}=8,6* \delta^{18}\text{O} +17,6 \quad (13)$$

Ce résultat est en concordance avec les observations effectuées à Madagascar (Nicolini, 1980) et à Mayotte (Eberschweiler, 1986). Pendant la saison sèche en climat tropical contrasté, les pentes et les excès en deutérium sont plus forts que ceux définis par la droite météorologique mondiale. Ceci traduirait un échange entre les précipitations et la vapeur atmosphérique produite par un flux évaporatoire local important, ce qui est le cas à la Réunion. Il est difficile d'invoquer un mélange avec des nuages issus d'une évaporation continentale (Nicolini, 1980; Eberschweiler, 1985) puisque l'île est bien trop isolée au milieu de l'Océan Indien.

Pour la saison humide (Fig.52), les points s'alignent sur une droite beaucoup plus proche de la droite de Craig (1961a).

$$\delta^2\text{H}=8,1* \delta^{18}\text{O} +9,6 \quad \text{avec } R=0,95 \quad (14)$$

La relation est établie d'une manière moins certaine puisque deux stations s'alignent sur la droite définie pour la saison sèche. Il s'agit des stations de Piton Maïdo et de Trois Bassins situées sur le flanc ouest du massif en altitude. Faut-il en déduire que ces deux stations reçoivent des pluies qui ont subi un échange significatif avec la vapeur issue des cirques situés en amont du flux d'alizés ?

Pour le cycle hydrologique 1985-1986 (Fig.53), les analyses sont pondérées par les hauteurs d'eau. La relation est alors proche de celle de Craig (en retirant bien évidemment les stations côtières).

$$\delta^2\text{H}=7,8* \delta^{18}\text{O} + 9,9 \quad \text{avec } R=0,95 \quad (15)$$

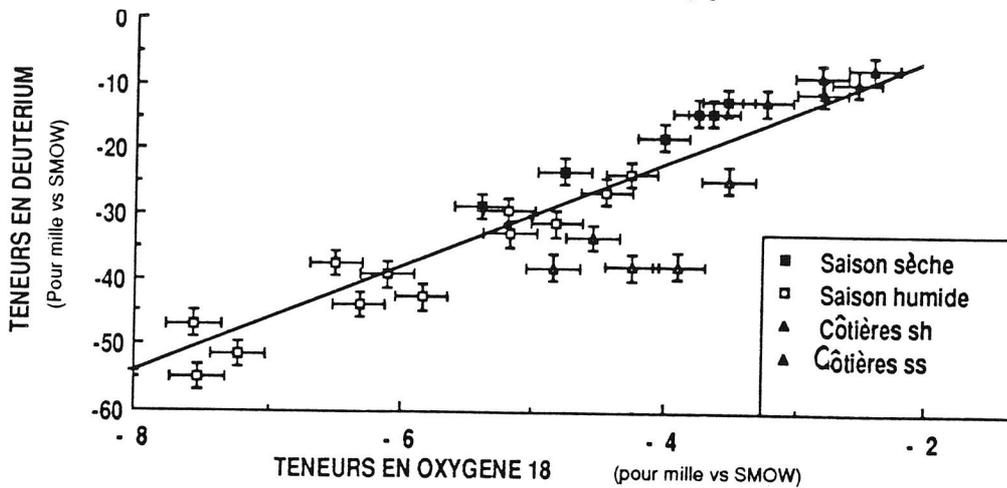


Fig.51: Relations entre ^{18}O et ^2H (en ‰ vs SMOW) dans les pluies de la saison cyclonique 1985-1986 et de la saison sèche 1985. Les stations côtières montrent une évaporation importante aussi bien en saison sèche qu'en saison humide qui les enrichit en ^{18}O .

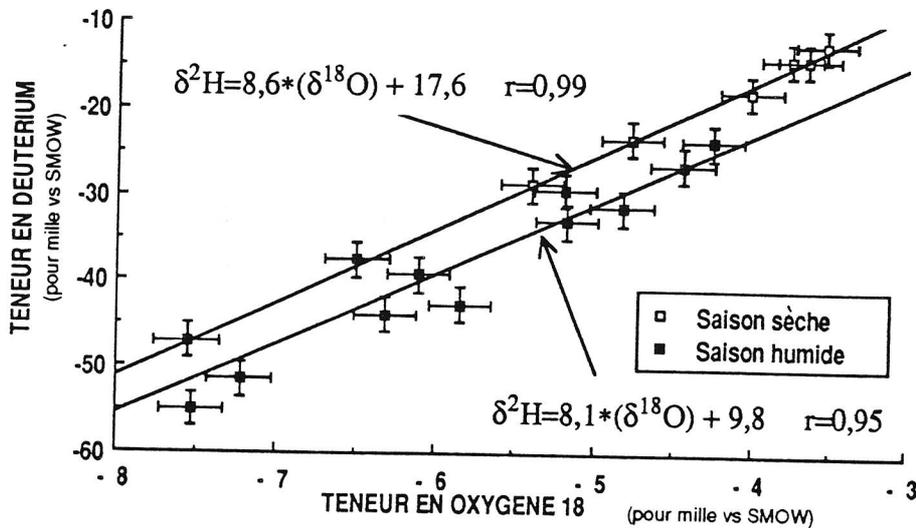


Fig.52: Relations entre ^{18}O et ^2H (en ‰ vs SMOW) dans les pluies de la saison cyclonique 1985-1986 et de la saison sèche 1985. Les droites saisonnières montrent des pentes similaires, avec des excès en ^2H qui diffèrent de 7 ‰ vs SMOW ; les pluies de saison sèche sont donc marquées par une continentalité plus grande. Deux points de la saison humide figurent sur la droite de la saison sèche ; ils sont placés aux débouchés des cirques.

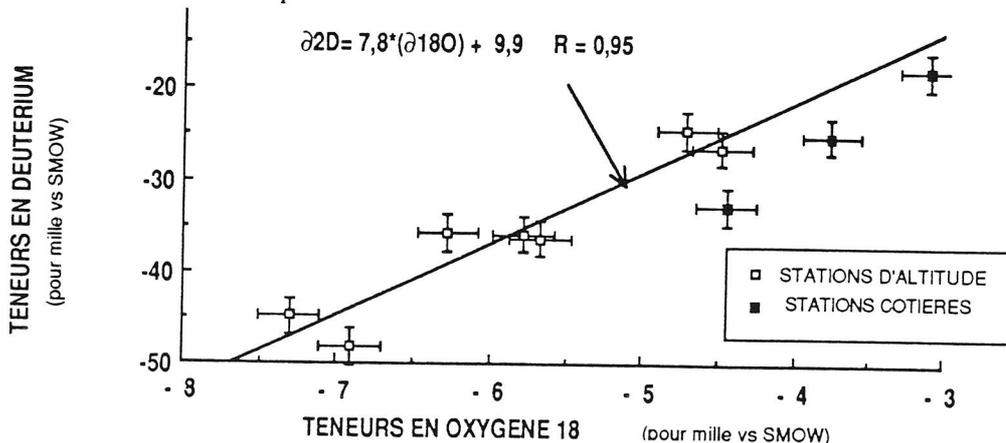


Fig.53: Relations entre ^{18}O et ^2H (en ‰ vs SMOW) dans les pluies du cycle hydrologique 1985-1986. La relation trouvée pour l'ensemble du cycle hydrologique est très proche de la droite de Craig.

La pente est identique à celle de la relation établie pour Mayotte (Eberschweiler, 1986) et l'excès en deutérium légèrement inférieur (11,5‰ à Mayotte). Cette différence pourrait être représentative d'une "continentalité" plus grande de Mayotte par sa proximité avec l'Afrique et Madagascar.

III.3 CONCLUSIONS SUR L'ETUDE HYDROCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES PLUIES.

L'étude a permis de préciser et de quantifier les variations naturelles des teneurs en éléments chimiques et en isotopes stables des précipitations.

Il est apparu que les teneurs chimiques sont assez constantes dans le temps, si l'on excepte d'épisodiques périodes de concentration par évaporation et de contaminations par des embruns marins. Spatialement, les teneurs moyennes sont fortement influencées par la proximité marine, et montrent une faible contamination qui est peut-être à relier à la présence au vent du volcan actif.

L'étude isotopique a permis de montrer une évaporation en cours de chute pour les stations côtières aussi bien en saison humide qu'en saison sèche. Il est probable que les pluies de saison sèche sont le fait d'un mélange entre la vapeur océanique et le flux évapotranspiratoire.

Les cartes des isoteneurs en ^{18}O montrent que les gradients altitudinaux sont variables dans le temps et dans l'espace, ce qui risque de compliquer sensiblement l'étude des altitudes d'alimentation des points d'eau. L'effet de masse causé par les fortes précipitations des épisodes cycloniques produit des variations naturelles importantes des teneurs qui devraient se retrouver dans les profils d'infiltrations et servir de signaux pour les temps de transit des eaux souterraines.

CHAPITRE QUATRIEME

ETUDE HYDROCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX DES SOLS SOUMIS

A EVAPORATION

RAPPEL DU SOMMAIRE / CHAP.IV: ETUDE HYDROCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX DES SOLS SOUMIS A EVAPORATION.

introduction	p.73
IV.1 Théorie des mouvements d'eau, d'ions chlorures et de molécules d'eau à ^{18}O dans le sol.	p.74
IV.1.1 Les mouvements en phase liquide : l'eau, les molécules à ^{18}O et les ions chlorures.	p.74
IV.1.1.1 Les mouvements de l'eau en phase liquide	p.74
IV.1.1.2 Les mouvements des ions et des molécules H_2^{18}O en phase liquide	p.74
IV.1.1.2.1 La convection	p.74
IV.1.1.2.2 La diffusion	p.75
IV.1.2 Mouvements en phase vapeur de l'eau et des molécules H_2^{18}O	p.75
IV.1.2.1 La convection	p.75
IV.1.2.2 La diffusion de vapeur	
IV.1.2.3 La diffusion des espèces isotopiques de l'eau	p.76
IV.1.3 Conclusion sur les mouvements d'eau, d'ions conservés et H_2^{18}O dans le sol.	p.77
IV.2 L'évaporation de nappe	p.78
IV.2.1 Comportement des isotopes stables de l'eau	p.78
IV.2.1.1 Allure théorique des profils isotopiques	p.78
IV.2.1.2 Les équations des profils isotopiques	p.80
IV.2.1.2.1 La région de transfert en phase vapeur	p.80
IV.2.1.2.2 la région de transfert mixte	p.80
IV.2.1.3 Le mode opératoire pour l'estimation de l'évaporation	
IV.2.1.3.1 Cas isotherme	p.82
IV.2.1.3.2 Cas anisotherme	p.82
IV.2.2 Le comportement des ions chlorures	p.83
IV.2.2.1 Introduction	p.83
IV.2.2.2 La modélisation de la concentration de la nappe dans le cas d'une nappe peu profonde	p.84
IV.3 Les autres conditions aux limites	p.86

IV.4. Applications	p.87
IV.4.1 Profils en situations de déficit hydrique	p.88
IV.4.1.1 Profil de S ^t Gilles -Kaufmant	p.88
IV.4.1.1.1 Situation et pédologie	p.88
IV.4.1.1.2 Teneurs volumiques en eau	p.88
IV.4.1.1.3 Teneurs isotopiques	p.88
IV.4.1.1.3.1 Description du profil	p.88
IV.4.1.1.3.2 Modélisation du flux par la méthode isotopique.	p.91
IV.4.1.1.4 Teneurs en chlorures	p.91
IV.4.1.1.4.1 Description	p.91
IV.4.1.1.4.2 Modélisation	p.91
IV.4.1.2 Profil de S ^t Paul	p.93
IV.4.1.2.1 Situation et pédologie	p.93
IV.4.1.2.2 Teneurs volumiques en eau	p.93
IV.4.1.2.3 Teneurs isotopiques	p.93
IV.4.1.2.3.1 Description du profil	p.93
IV.4.1.2.3.2 Modélisation du flux par la méthode isotopique.	p.93
IV.4.1.2.4 Teneurs en chlorures	p.95
IV.4.1.2.4.1 Description	p.95
IV.4.1.2.4.2 Modélisation	p.95
IV.4.1.3 Profil d'Etang Salé	p.97
IV.4.1.3.1 Situation et pédologie	p.97
IV.4.1.3.2 Teneurs volumiques en eau	p.97
IV.4.1.3.3 Teneurs isotopiques	p.97
IV.4.1.3.4 Teneurs en chlorures	p.99
IV.4.1.3.4.1 Description	p.99
IV.4.1.3.4.2 Modélisation	p.99
IV.4.2 Profils en situations d'excédents hydriques	p.101
IV.4.2.1 Introduction	p.101
IV.4.2.2 Profil de Trois Bassins	p.101
IV.4.2.3 Profil de Beaumont	p.108
IV.4.2.4 Profil de La Montagne	p.112
IV.4.2.5 Profil de Grand Etang	p.114
IV.4.5.6 Le problème des concentrations en ions chlorures	p.114
IV.5 Synthèse des résultats	p.118
IV.5.1 Les profils en situation d'évaporation de nappe	p.118
IV.5.1 Les profils en situation d'excédent hydrique	p.118

INTRODUCTION

La concentration des ions chlorures dans l'eau des sols soumis à évaporation est étudiée depuis longtemps alors que les derniers développements concernant le comportement naturel des isotopes constitutifs fait l'objet de recherches toutes récentes. Les deux thèmes sont désormais considérés comme complémentaires. Nos objectifs dans cette partie de l'étude étaient :

- d'appliquer dans les zones à **forts déficits hydriques annuels** une méthode maintenant bien rodée de détermination de l'E.T.R.(Gouvea da Silva Rosa, 1980; Barnes & Allisson, 1983; Zouari,1983; Yousfi, 1984; Colin-Kaczala, 1986; Fontes *et al*, 1986),
- de tester dans les zones à **forts excédents hydriques annuels** une méthode qui n'avait jamais été employée dans des sols à teneur en eau supérieure à 10%.

Rappels:

- L'E.T.R. est l'évapotranspiration réelle, c'est la densité de flux de vapeur d'eau ($L.T^{-1}$) du sol vers l'atmosphère, elle est exprimée généralement en $mm.an^{-1}$.
- Les termes excédents et déficits hydriques proviennent de la comparaison entre ETP et la hauteur de pluie (P) à une échelle de temps donnée. Avec $ETP < P$, $P-ETP$ est l'excédent, avec $ETP > P$, $ETP-P$ est le déficit.

Dans la première partie de ce chapitre nous rappellerons les équations différentielles qui régissent le transfert des ions chlorures, des molécules d'eau, et des molécules d'eau à oxygène 18. Cet examen nous amenera tout naturellement à considérer le sol comme un système différentiel, régi par des conditions initiales et aux limites.

Dans le cas théorique d'une "évaporation de nappe" le système d'équations admet des solutions approchées assez simples pour les compositions isotopiques et les ions chlorures, ces solutions sont l'objet de la deuxième partie de ce chapitre.

Mais les conditions, initiales et aux limites, réelles sont souvent différentes de "l'évaporation de nappe" cela est l'objet de la troisième partie.

En quatrième partie, nous examinerons les résultats analytiques à leur interprétation. La cinquième partie permettra de conclure.

IV.1 THEORIE DES MOUVEMENTS DE L'EAU, D'IONS CHLORURES ET DE ^{18}O DANS UN SOL.

Dans un sol l'eau se déplace en phase liquide et en phase vapeur; les ions chlorures ne se déplacent qu'en phase liquide.

IV.1.1 Mouvements en phase liquide: eau, ^{18}O et ions chlorures.

IV.1.1.1 Mouvements d'eau en phase liquide.

L'eau circule dans un sol non saturé selon les gradients de potentiel, d'après la loi de Darcy modifiée (De Vries, 1957):

$$Q_m^l = -K \cdot \text{grad}(\emptyset) \quad \text{avec} \quad \emptyset = -Z + \Omega \quad (16)$$

Q_m^l	= densité de flux du liquide	m.s^{-1}	L.T^{-1}
Z	=potentiel altitudinal (par rapport à une référence)	m	L
\emptyset	=potentiel total de l'eau	m	L
K	=perméabilité de Darcy en milieu non saturé	m.s^{-1}	L.T^{-1}
Ω	=potentiel matriciel	m	L

Remarque: L'expression qui semble simple est compliquée par une très forte non linéarité due à la dépendance entre la perméabilité et le potentiel matriciel (De Marsily, 1981).

IV.1.1.2 Mouvements des ions et des molécules isotopiques en phase liquide.

Les molécules d'eau qui contiennent ^{18}O et les ions sont soumis aux flux liquides, mais diffusent également selon des gradients de teneurs.

IV.1.1.2.1 La convection.

La convection dépend des teneurs et du flux liquide :

$$Q_{ci}^l = Q_m^l \cdot R_i \quad (17)$$

Q_{ci}^l	est la densité de flux convectif d'isotopes i	m.s^{-1}	L.T^{-1}
Q_m^l	est la densité de flux liquide	m.s^{-1}	L.T^{-1}
R_i	est le rapport d'abondance de l' isotope i	sans dimension	
	Pour les teneurs en ions chlorures, on exprime le flux en flux massique ($\text{M.L}^{-2}.\text{T}^{-1}$), $R_i = C_i$ (M.L^{-3})		

IV.1.1.2.2 La diffusion.

La diffusion est causée par les gradients des teneurs :

$$Q_{di}^l = -D_{i,r}^{lr} \cdot \text{grad} (R_i) \quad (18)$$

Q_{di}^l est la densité de flux diffusif de l'isotope i
pour les concentrations ioniques, on raisonne en flux massique

$m \cdot s^{-1}$
 $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

$L \cdot T^{-1}$
 $M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$

R_i est le rapport d'abondance de l'isotope i

$kg \cdot m^{-3}$

sans dimension
 $M \cdot L^{-3}$

Pour les concentrations ioniques, on raisonne en concentrations

$D_{i,r}^{lr}$ est la diffusivité, relative au milieu, de l'isotope i en phase liquide, prenant en compte les effets de la tortuosité et de la teneur en eau.

une estimation de $D_{i,r}^{lr}$ peut être :

$$D_{i,r}^{lr} = W \cdot T \cdot D_i^l \quad (19)$$

W est la teneur volumique en eau

sans dimension,

T est la tortuosité

sans dimension,

D_i^l est le coefficient de diffusion de l'isotope i

$cm^2 \cdot s^{-1}$

$L^2 \cdot T^{-1}$,

en eau libre ces coefficients sont thermodépendants (Haris et Wolf, 1980 in Colin Kaczala, 1986).

Remarque: les espèces chimiques interfèrent du point de vue diffusif. L'on devrait, en toute rigueur définir des coefficients de diffusion "croisés".

IV.1.2 Mouvements en phase vapeur de l'eau et des molécules d'eau isotopiques.

IV.1.2.1 La convection.

D'après Barnes et Allison (1983), il n'y a pas lieu de tenir compte du phénomène de convection de gaz par différences de pression : il est négligeable. En effet, il est circonscrit aux horizons superficiels et les variations de pression barométrique imposées par l'atmosphère sont de trop courtes périodes pour que l'on doive en tenir compte ici.

IV.1.2.2 La diffusion de vapeur.

D'après la loi de Fick modifiée pour les milieux poreux, il existe un flux de diffusion de vapeur proportionnel au gradient de teneur en eau de l'air des pores.

$$Q_v = -(D_m^{vr}) \cdot \text{grad}(h \cdot N_{\text{sat}}) \quad (20)$$

Q_v est le flux de masse diffusif de vapeur $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ $\text{M.L}^{-2}.\text{T}^{-1}$,
 h est l'humidité relative dans l'air des pores du sol sans dimension,
 N_{sat} est la teneur volumique en eau à saturation de l'air des pores kg.m^{-3} M.L^{-3} ,
 D_m^{vr} est le coefficient de diffusion relatif au milieu qui comprend les effets de la teneur en eau de la tortuosité.

Une estimation de D_m^{VR} peut être:

$$(D_m^{VR}) = D^v \cdot F \cdot T \cdot (P - W) \quad (21)$$

D^v est le coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ $\text{L}^2.\text{T}^{-1}$,
 F est le facteur d'écoulement de masse (proche de 1 dans le sol) sans dimension,
 T est la tortuosité sans dimension,
 P est la porosité sans dimension,
 W est la teneur volumique en eau sans dimension.

IV.1.2.3 La diffusion des espèces isotopiques de l'eau.

Elle s'opère suivant les gradients de teneurs par volume d'air :

$$Q_v^i = -(D_m^{vr_i}) \cdot \text{grad}(R_v^i \cdot h \cdot N_{\text{sat}}) \quad (22)$$

Q_v^i est le flux massique vapeur de l'isotope i $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ $\text{M.L}^{-2}.\text{T}^{-1}$,
 h est l'humidité relative sans dimension,
 N_{sat} est la densité à saturation de l'eau dans l'air kg.m^{-3} M.L^{-3} ,
 R_v^i est le rapport d'abondance de l'isotope i de la vapeur d'eau sans dimension,
 $D_m^{vr_i}$ est le coefficient de diffusion de l'isotope i dans l'air des pores.

On l'estime $D_m^{vr_i}$ égal à : $D_m^{vr_i} = D_m^{vr} / \sigma_i \quad (23)$

D_m^{VR} est le coefficient de diffusion dans l'air $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ $\text{L}^2.\text{T}^{-1}$,
 σ_i est l'excès de diffusion de l'isotope i (Merlivat, 1978) sans dimension.

IV.1.3 Conclusions sur les mouvements d'eau, d'ions conservés et d'isotopes dans le sol.

Le sol peut être assimilé à un système soumis à des variations exprimables par des équations différentielles.

Les flux dépendent de gradients de valeurs qui ne sont pas indépendantes, par exemple la température influe sur les coefficients de diffusion, les potentiels matriciels. Les éléments de définition des différents flux sont rappelés ci-dessous.

flux	principaux éléments de définition des flux
flux liquide en eau	Températures, perméabilité de darcy, potentiel matriciel section de transfert, tortuosité, continuité des filets liquides.
Flux Isotopique en phase liquide	flux liquide en eau , gradient des teneurs isotopiques, diffusivité, excès de diffusion.
Flux d'eau en phase vapeur	températures, humidité relative de l'air des pores, section de transfert, diffusivité en phase vapeur.
Flux Isotopique en phase vapeur	flux d'eau en phase vapeur , gradients des teneurs, excès de diffusion.

La résolution du système d'équations différentielles n'est possible que pour des conditions aux limites bien déterminées. Celles-ci imposent différents scénarii; le plus simple est celui d'une nappe peu profonde qui alimente un flux évaporatoire vers la surface, mais les situations réelles sont souvent différentes du fait des infiltrations des pluies et/ou de l'absence de nappe en profondeur.

IV.2 L'EVAPORATION DE NAPPE.

Soit une nappe libre dont le niveau piezométrique, considéré comme invariant est situé à une profondeur Z_0 ($< 20\text{m}$); la teneur isotopique de l'eau de la nappe est de δ_{res} , et sa concentration en un ion conservé est de C_{res} , ces deux teneurs ne varient pas. La surface du sol est en contact avec une atmosphère avec une humidité relative h constante (et faible) avec une teneur isotopique de l'eau sous forme vapeur δ_{at} .

Quel que soit l'état initial, il apparaît au bout d'un temps t et en l'absence d'infiltration que le profil des teneurs isotopiques devient invariable. Le sol a atteint **un régime permanent d'évaporation**. A ce stade d'évolution le débit d'eau (vapeur + liquide) est constant sur tout le profil. Du fait que t est largement supérieur à la journée, le système à l'équilibre est **inertiel** et intègre les variations journalières. Du point de vue des teneurs chimiques (les ions chlorures), l'eau du profil se charge en sels dissous jusqu'à l'apparition d'une croûte saline, c'est un des processus en cause dans la salinisation des sols (concentration des eaux de la nappe).

Remarque: Le régime d'évaporation de nappe est une situation courante dans les pays tropicaux à saison sèche, dans les endroits où il existe une nappe aquifère peu profonde, (nappes alluviales, nappes dites "phréatiques"). Bien entendu, le temps d'installation du régime permanent, dépend de l'état initial, de la profondeur de la nappe, du caractère plus ou moins asséchant de l'atmosphère.

IV.2.1 Comportement des isotopes stables de l'eau.

IV.2.1.1 Allure théorique des profils isotopiques.

Le modèle développé par Barnes et Allison (1983) fournit les équations théoriques des profils isotopiques de l'eau d'un sol en état d'évaporation au-dessus d'une nappe (Fig.54).

Ces profils sont divisibles en deux régions :

une région de transfert en phase vapeur, où le gradient des teneurs est positif; le profil part d'un minimum en surface ($\delta_{\text{at}} + \epsilon_{(l-v)}$) jusqu'à un maximum (δ_{ef}) situé à une profondeur Z_{ef} . Il s'agit d'une zone de diffusion et de mélange des flux de vapeurs, évaporatoire et atmosphérique,

Une région de transfert mixte (phases liquide et vapeur) où les teneurs décroissent, de la teneur δ_{ef} jusqu'à la teneur δ_{res} .

Dans le cas où une variation de température exponentielle est pris en compte, les teneurs du profil atteignent des valeurs inférieures à δ_{res} , Z_{ef} est plus grand et δ_{ef} plus petit.

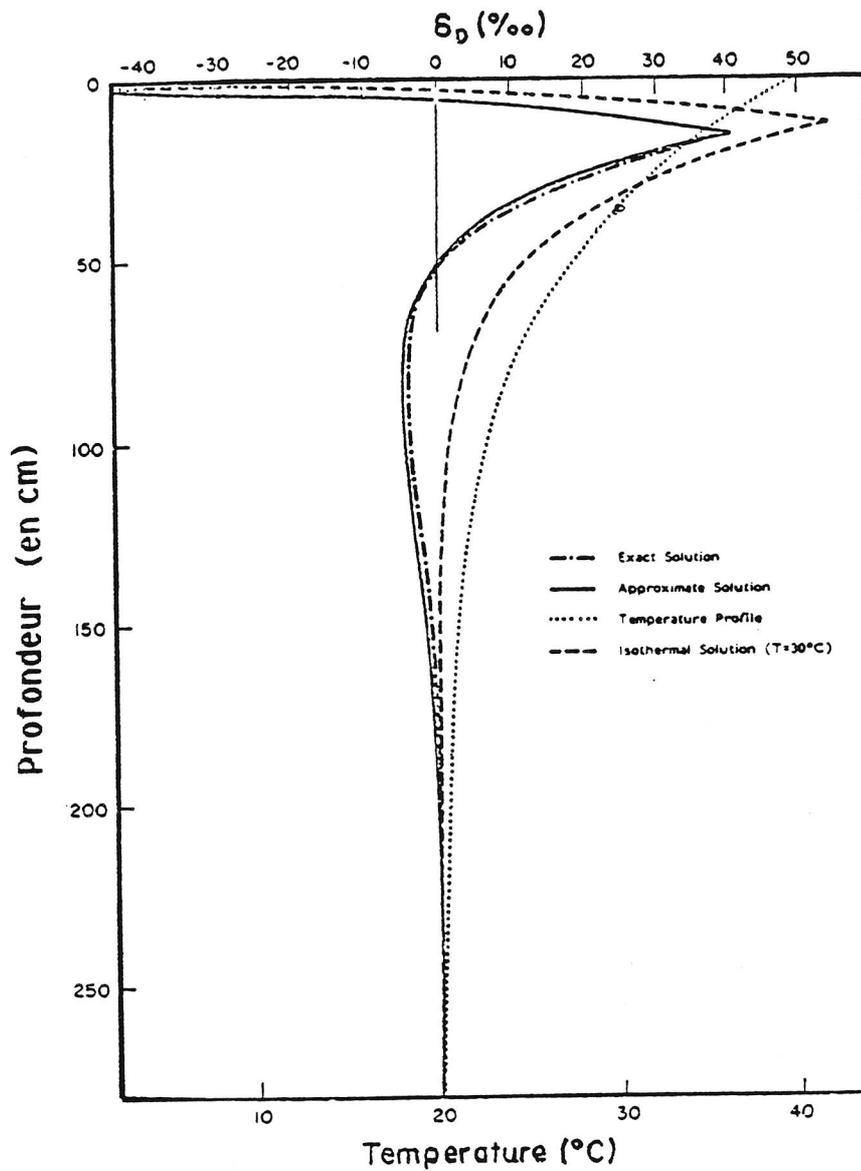


Fig.54: Profil isotopique théorique de l'eau d'un sol en ^2H , d'après Allison et Barnes (1983). Deux zones apparaissent très nettement: la zone supérieure ou zone de transfert vapeur, où la diffusion gazeuse de la vapeur d'eau atmosphérique est prédominante, la zone inférieure, ou zone de transfert mixte, où la diffusion en phases liquide et vapeur intervient.

IV.2.1.2 Equations des profils isotopiques.

IV.2.1.2.1 Région de transfert en phase vapeur.

Le profil isotopique est décrit par :

$$\delta_z = \left[\left(1 - \frac{C}{h \cdot N_{\text{sat}}} \right) \cdot \frac{\sigma}{\alpha} \cdot (1000 + \delta_{\text{res}}) \right] - 1000 \quad (24)$$

δ_z est la teneur isotopique à la profondeur z	% vs SMOW ,	
C est la constante du profil évaporatoire	sans dimension,	
h est l'humidité relative	kg. m ⁻³	M.L ⁻³ ,
N_{sat} est la teneur en eau saturante		sans dimension,
σ est l'excès du taux de diffusion de l'espèce isotopique en phase vapeur (Merlivat, 1978)	% sans dimension	
α est le facteur de fractionnement (liquide- vapeur) de l'espèce isotopique,	% vs SMOW.	
δ_{res} est la teneur isotopique de base de profil		

IV.2.1.2.2 Région de transfert mixte.

Si le flux de vapeur est significatif et le profil isotherme, le profil est décrit par la relation:

$$\delta_z = \left[\delta_{\text{eff}} - \delta_{\text{res}} \right] \cdot \exp\left(-\xi(z)/Z\right) + \delta_{\text{res}} \quad (25)$$

avec la fonction de pondération ξ :

$$\xi(z) = \text{moy}_z(W) \cdot \int_{Z_{\text{ef}}}^z \left[W_z + (N_{\text{sat}} \cdot D^v \cdot (P - W_z)) / d \cdot D^l \right]^{-1} \cdot dz \quad (26)$$

δ_z est la teneur isotopique de l'eau au niveau z	% vs SMOW,	
δ_{eff} est la teneur isotopique la plus forte du profil	% vs SMOW,	
δ_{res} est la teneur isotopique en bas de profil	% vs SMOW ,	
Z est la profondeur caractéristique de la diffusion isotopique dans le sol	m	L
D^v et D^l sont les coefficients de diffusion de l'espèce isotopique en question dans l'air et dans l'eau.	m ² .s ⁻¹	L ² .T ⁻¹ ,
P est la porosité du matériel	sans dimension,	
N_{sat} est la teneur d'eau à saturation de l'air des pores	kg.m ⁻³	M.L ⁻³ ,
$\text{moy}_z(W)$ est la moyenne selon les profondeurs (z) de la teneur volumique en eau		sans dimension,
d est la masse volumique de l'eau liquide	kg.m ⁻³	M.L ⁻³ ,
Z est la profondeur par rapport à la surface	m	L.

Si le transfert en phase liquide prédomine réellement et que le profil est considéré comme isotherme, le profil est décrit par :

$$\delta_z = [\delta_{ef} - \delta_{res}] \cdot \exp(-\xi(z)/Z) + \delta_{res} \quad (25)$$

mais avec cette fois ci :

$$\xi(z) = \int_{z_{ef}}^z \sigma \cdot dz \quad (27)$$

σ est l'excès de diffusion de l'espèce isotopique considérée

sans dimension.

Une estimation de la grandeur relative des flux liquides et vapeur peut être donnée par:

$$Q^v/Q^l \approx Z^v/Z^l = N_{sat} \cdot \overset{moy}{D^v} \cdot (P-W) / (d \cdot \overset{moy}{D^l} \cdot W) \quad (28)$$

Q^v et Q^l sont les débits vapeurs et liquides,

Z^v et Z^l sont les profondeurs caractéristiques des diffusions en phases vapeur et liquide les autres valeurs étant définies ci-dessus.

Cette estimation permet de choisir l'équation applicable.

Dans les deux cas l'estimation du flux vertical d'eau ou l'évaporation est donnée par :

$$E = \overset{moy_z}{W} \cdot \tau \cdot D^l / Z \quad (29)$$

E est la densité de flux évaporatoire

$m \cdot s^{-1}$

$L \cdot T^{-1}$,

$\overset{moy_z}{W}$ est la moyenne selon les profondeurs de la teneur volumique en eau

sans dimension,

D^l est le coefficient de diffusion dans l'eau de l'isotope considéré

$m^2 \cdot s^{-1}$

$L^2 \cdot T^{-1}$,

τ est la tortuosité

sans dimension,

Z est la profondeur caractéristique de la diffusion de l'espèce isotopique

m

L .

IV.2.1.3 Mode opératoire pour l'estimation de l'évaporation.

IV.2.1.3.1 Cas isotherme.

Dans les cas où l'on estime le profil isotherme, l'ajustement du modèle se fait en estimant par la méthode des moindres carrés le paramètre $1/Z$ à l'aide de la corrélation entre :

$\ln\left[\frac{[\delta_z - \delta_{res}]}{[\delta_{ef} - \delta_{res}]}\right]$ et $\xi(z)$ (eq.27 ou 26) dite "fonction de calage" ou "fonction de pondération" choisie en fonction du calcul du rapport Z^v/Z^l (eq.28).

IV.2.1.3.2 Cas anisotherme.

L'équation qui régit le profil anisotherme est une équation différentielle du premier ordre par rapport à la profondeur (Barnes & Allison, 1983):

$$\frac{\partial[\delta_z]}{\partial z} + \frac{[\delta_z - \delta_{res}]}{(Z_1 + Z_v \cdot h)} = \frac{(h \cdot Z_v) \cdot (\varepsilon + \sigma)}{(Z_1 + h \cdot Z_v)} \cdot \frac{\partial(\ln(h \cdot N_{sat} \cdot (\varepsilon + \sigma)))}{\partial z} \quad (30)$$

∂ est le symbole de la différenciation,

δ_z est la teneur isotopique à la profondeur z

δ_{res} est la teneur isotopique en bas de profil

h est l'humidité relative de l'air du sol

Z_v, Z_1 sont les profondeurs caractéristiques des diffusions gazeux et liquide m

N_{sat} est la teneur en eau de l'air à saturation

ε est le facteur d'enrichissement isotopique à l'évaporation

σ est l'excès de diffusion de l'isotope considéré

‰ vs SMOW,

‰ vs SMOW,

sans dimension,

L

kg.m⁻³

M.L⁻³,

sans dimension,

sans dimension.

La dérivée qui figure au second membre dépend du gradient de température dans le sol, si bien que, dans le cas isotherme, ce membre est égal à zéro. Cette équation est numérisable selon un modèle implicite. Si l'on estime que l'air des pores est d'une humidité relative proche de 1, ce qui est couramment admis (Colin-Kaczala, 1986)), et que Z_v et Z_1 sont relativement constants:

$$\delta_{(z+\Delta z)} = \left[\frac{(\delta_{res} - \delta(z))}{(Z_1 + Z_v)} \right] + \left(\frac{Z_v}{(Z_v + Z_1)} \right) \cdot \Delta T + \delta(z) \quad (31)$$

$$\Delta T = \left[\left[\ln(N_{sat}(z+\Delta z) \cdot (\varepsilon(z+\Delta z) + \sigma)) \right] - \left[\ln(N_{sat}(z) \cdot (\varepsilon(z) + \sigma)) \right] \right] \cdot [\varepsilon(z) + \sigma] \quad (32)$$

avec les mêmes conventions que précédemment.

Il va de soi que le terme ΔT est dépendant du gradient vertical des températures. Enfin le calage est effectué sur les profondeurs caractéristiques de diffusion en comparant les profils obtenus par modélisation et ceux obtenus sur le terrain.

IV.2.2 Comportement des ions chlorures dans un sol.

IV.2.2.1 Introduction.

Le chlorure dissous a généralement pour origine première le réservoir marin, soit directement par la salinisation des aquifères côtiers (Cf.§VI) soit indirectement par le biais des pluies qui en contiennent un peu (Cf.§III). Enfin, et ceci est important, le chlorure des roches n'est pratiquement jamais disponible à la dissolution, particulièrement dans les roches magmatiques (Schoeller, 1962).

L'ion chlorure est considéré comme un ion "**conservé**" en solution. Ceci est dû au pouvoir particulièrement élevé de dissolution des composés chlorurés qui prémunissent cet ion contre la précipitation, même lors de variations importantes de la force ionique des solutions; c'est pourquoi, cet élément est souvent pris comme **référentiel de la concentration des eaux par évaporation** (Schoeller, 1962; Freeze et Cherry, 1979).

Au contraire des isotopes stables il n'y a pas stabilisation des teneurs au cours d'un processus d'évaporation, dans les premières couches du sol. Si l'évaporation se poursuit, on obtient une croûte de sels.

Remarque : La propriété des ions chlorures d'être "conservés" en solution est mise en cause lors des évaporations extrêmes, comme la formation des "croûtes de sels" dans les horizons superficiels. Néanmoins, la mesure par lixiviation, permet de tenir compte de ces dépôts salins dans la concentration des eaux.

Ainsi à la différence des profils isotopiques qui sont le reflet des **conditions actuelles**, les profils de teneurs en chlorures sont indicateurs du **flux évaporatoire passé**. Dans le cas où l'on connaît le régime actuel d'évaporation (par exemple avec la méthode isotopique), il devient possible d'estimer le temps écoulé depuis le dernier lessivage comme l'ont fait Fontes et al (1986), Colin-Kaczala (1986), pour retrouver le dernier épisode paléoclimatologique humide en Afrique de nord. Notre propos est différent puisque les échéances sont **beaucoup plus courtes et saisonnières**.

IV.2.2.2 Modélisation de la concentration en chlorures dans le

cas d'une évaporation d'une nappe peu profonde.

Si l'on considère que la quantité d'ions chlorures stockée dans le profil est due à la concentration de l'eau de la nappe par évaporation :

$$M(t) = \int_{t_0}^t C_{res} \cdot E(t) \cdot \partial t \quad (33)$$

M(t) est la masse d'ions chlorures stockée dans le profil par mètre carré (de surface de sol) de la surface jusqu'à la nappe au temps t.	meq.m ⁻²	M.L ⁻² ,
C _{res} est la concentration des eaux de la nappe	meq.l ⁻¹	M.L ⁻³ ,
E(t) est la densité de flux évaporatoire	l. m ⁻² .j ⁻¹	L.T ⁻¹ ,
t ₀ est la date du dernier lessivage	j	T,
t est la date	j	T.

Si l'on considère la valeur C_{res} constante au cours du temps, la lame d'eau évaporée (ET) depuis le lessivage est de:

$$ET = M(t)/C_{res} \quad (34)$$

il est alors possible de calculer le taux d'évaporation moyen depuis le dernier épisode de lessivage du profil :

$$E_{moy} = ET/(t-t_0) \quad (35)$$

(avec les mêmes conventions que précédemment).

Mais il est préférable de considérer le flux évaporatoire comme un **phénomène dynamique**. Le fait que le sol en s'asséchant développe dans les horizons superficiels une "barrière à l'évaporation", conduit à admettre comme schéma directeur que le taux d'évaporation subit une loi de décroissance de type exponentielle après une période humide (Black *et al*, 1969).

$$E(t) = E(t_0) \cdot e^{-K \cdot [t-t_0]} \quad (36)$$

E(t) est le flux évaporatoire au temps t	mm.j ⁻¹	L.T ⁻¹ ,
E(t ₀) est le flux évaporatoire juste après lessivage	mm.j ⁻¹	L.T ⁻¹ ,

t_0 est la date du lessivage
 K est une constante de calage.

j

T,

Si l'on suppose:

- $E(t_0)$ proche de l'E.T.P. (évapotranspiration potentielle),
- que l'on connaît ET par le stock d'ions chlorures dans le profil,
- que $t-t_0$ est connu par les relevés météorologiques,

il devient possible d'estimer K la constante de décroissance logarithmique du taux d'évaporation de nappe.

En effet en intégrant sur $t-t_0$ jours, on obtient :

$$ET/E(t_0) = (1 - e^{(-K \cdot T)}) / K \quad (37)$$

t_0 est la date du lessivage du profil,

ET est la lame d'eau évaporée depuis le dernier lessivage

mm

L,

T est le temps écoulé depuis le dernier lessivage

j

T,

K est la constante de décroissance de l'évaporation du sol

 j^{-1} T^{-1} ,

$E(t_0)$ est la valeur d'évaporation maximale juste après le lessivage $mm \cdot j^{-1}$

L.T⁻¹.

Si K est l'inconnue, sa valeur est obtenue par itérations en minimisant la différence entre les deux termes de l'équation. La résolution de l'équation permet de calculer une estimation de $E(t)$ par la formule de décroissance générale.

IV.3. AUTRES CONDITIONS AUX LIMITES.

La difficulté de modélisation des cas naturels provient du fait que, en dehors du cas de l'évaporation de nappe, les conditions aux limites sont variables avec le temps.

Par exemple, lorsque des infiltrations dues aux pluies séparent des courts épisodes évaporatoires, le sol ne se comporte plus comme un système "simple", du fait de l'importance prise par sa réserve en eau. De plus, la nappe, n'est plus la principale source d'eau car l'alimentation s'effectue aussi par le haut. Du point de vue des teneurs, les variations doivent pour être comprises, tenir compte de la surimposition de plusieurs processus élémentaires, tels, la variation des teneurs dans l'alimentation du profil par les pluies, la migration de l'eau vers le bas lors des épisodes d'infiltrations, l'évaporation dans la partie supérieure du profil.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, les pluies présentent avec le temps, des variations de teneurs importantes en ^{18}O mais faibles en ions chlorures.

En l'absence d'évaporation, ces variations doivent se retrouver dans les profils verticaux si l'on admet que l'infiltration se fait par effet piston ("piston-flow" de la littérature anglo-saxonne). L'eau nouvellement infiltrée "pousse" l'eau préexistante devant elle, sans formation de mélanges. A ces variations de teneurs causées par les fluctuations des teneurs d'entrée se superposent probablement les effets des épisodes d'évaporations concentrant les parties supérieures des profils en ^{18}O et Cl^- . Si l'infiltration reprend et que l'écoulement se produit par "piston-flow", le profil montre alors, en profondeur, des "pics" de concentrations correspondant à la migration des "fronts d'évaporations".

IV.4. APPLICATIONS.

Introduction :

- les sept profils effectués peuvent se séparer en deux catégories distinctes :

-Trois d'entre eux sont situés (Fig.25) dans la partie la plus aride de l'île en situation de **déficit hydrique annuel marqué** (au moins 400mm), à des altitudes inférieures à 20m, les échantillons sont constitués de sables côtiers et alluvionnaires qui abritent une nappe superficielle à une profondeur maximale de 4 m.

-Les quatre autres sont situés à des altitudes supérieures à 400m et présentent des **excédents hydriques annuels supérieurs à 500 mm**, les échantillons sont constitués d'andosols ou de sols ferrallitiques andiques, il n'existe généralement pas de nappe superficielle en profondeur mais les niveaux inférieurs présentent toujours une **teneur en eau remarquable**.

IV.4.1 Profils en situation de déficit hydrique.

Dans cette partie du travail sont présentés les résultats sur les sites de prélèvement de S^tGilles, St Paul, Etang Salé qui, du fait de leur situation, peuvent tous être interprétés comme le résultats d'une évaporation de nappe.

IV.4.1.1 Profil de S^t Gilles-Kaufmant.

IV.4.1.1.1 Situation et pédologie.

Le profil de S^t Gilles Kaufmant est situé au lieu dit "les Filaos" sur la commune de S^t Paul (Annexe 3). Le terrain est une plaine non cultivée à végétation herbacée courte, jaunie au moment du prélèvement (12/10/1986). Le profil est essentiellement constitué de sables coralliens assez homogènes (Fig.55) avec toutefois un niveau plus limoneux en surface, et vers 1m de profondeur, des éléments coralliens centimétriques. La nappe, rencontrée à 1,4m, connue sous le nom de "nappe des sables" est exploitée surtout pour l'irrigation. Il est par ailleurs établi, (Join,1986) que le niveau piézométrique de cette nappe oscille très légèrement avec la marée, avec une amplitude d'environ 5cm.

IV.4.1.1.2 Teneurs volumiques en eau.

Le profil (Fig.56) est caractéristique d'une évaporation nourrie par une nappe de faible profondeur. Les teneurs en eau varient grossièrement d'une manière exponentielle d'un minimum en surface (3%), jusqu'à un maximum à 1,4m (34%). Les calculs de teneurs volumiques en eau sont basés sur les mesures de densités humides en faisant l'hypothèse que la mesure à 1,4 m est représentative de la saturation, donc que l'eau occupe tous les pores. La porosité est donc estimée égale pour l'ensemble du profil à 34%, ce qui est une valeur raisonnable pour un terrain sableux (Bear, 1972).

IV.4.1.1.3 Teneurs en ¹⁸O de la solution du sol.

IV.4.1.1.3.1 Description du profil.

Le profil (Fig.57) présente très nettement une allure exponentielle. La région de transfert en phase vapeur n'est pas détectée, mais la première mesure disponible se situe à 0,075 m sous la surface. Un prélèvement sur la surface a été effectué mais la quantité d'eau extraite s'est avérée trop faible (<3ml) pour une analyse classique. Le profil se présente donc comme une fonction exponentielle de la profondeur perturbée aux niveaux -0,55 et -0,67m. L'écart des teneurs est de 9,5 ‰ vs SMOW. A -0,9m la teneur est légèrement inférieure aux teneurs de la base du profil ce qui semble indiquer un effet minime du gradient de température. En effet le profil des températures mesurées à la mi-journée montre une différence de 5,4°C entre la profondeur -0,85m et la surface.

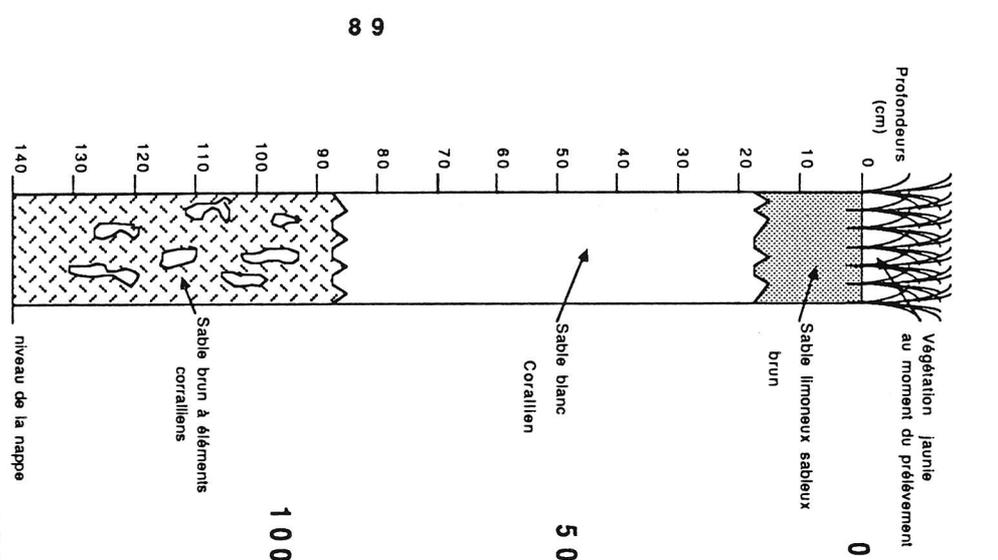


Fig.55: Lithologie du profil S1 Gilles Kaufmant.
La nappe est rencontrée à 1,4 m, le terrain est plat.

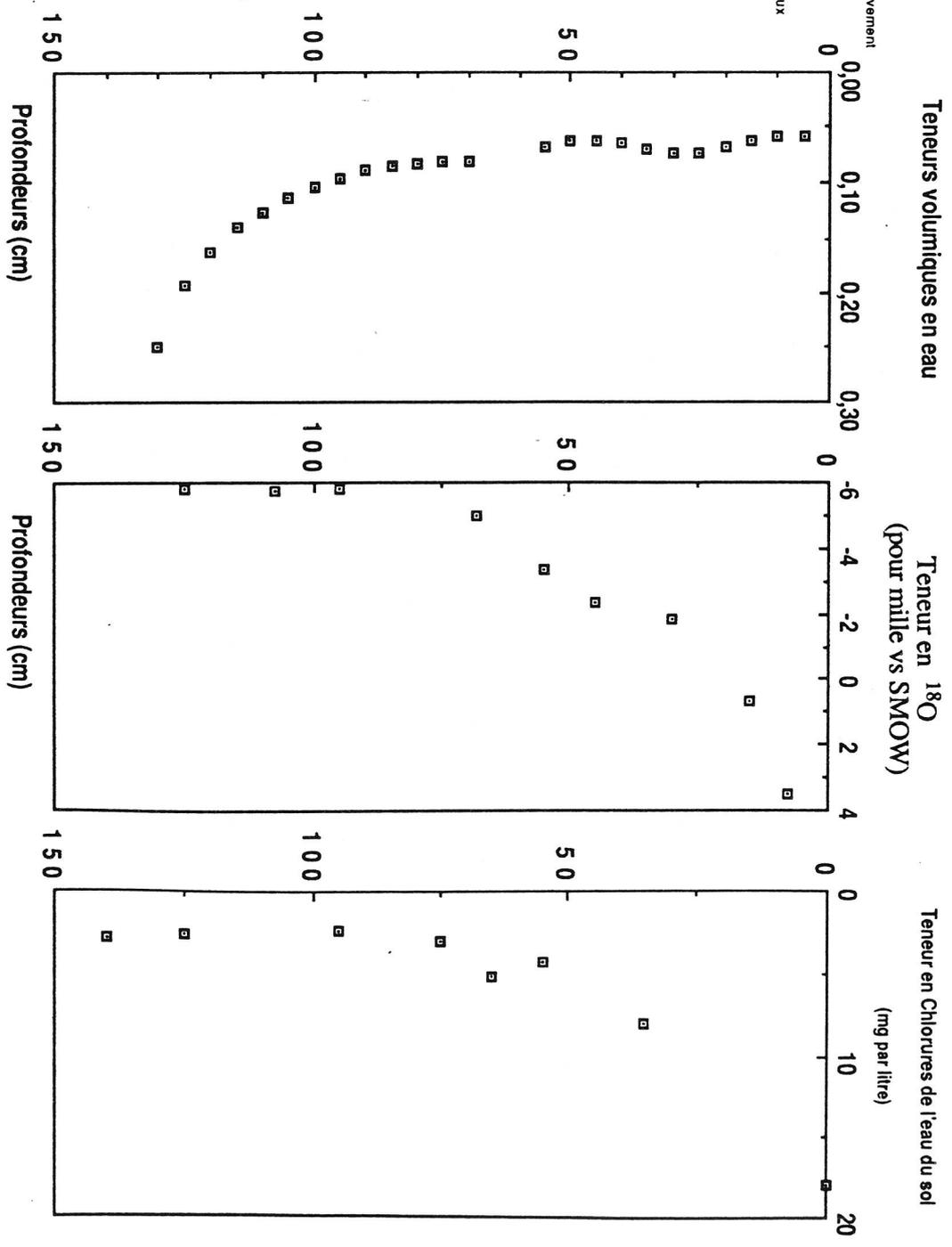


Fig.56: Profil des teneurs volumiques en eau du sol de S1 Gilles Kaufmant.
Les teneurs décroissent selon une allure exponentielle de la nappe à la surface du sol.

Fig.57: Profil des teneurs en 18O (en ‰ vs SMOW) de l'eau du sol de S1 Gilles Kaufmant. Le profil montre une tendance exponentielle à l'enrichissement de la nappe vers la surface avec une perturbation minimale du profil entre 40 et 60cm de profondeur.

Fig.58: Profil des teneurs en Cl- (en mg.l-1) de l'eau du sol de S1 Gilles Kaufmant. Le profil montre une tendance exponentielle à l'enrichissement de la profondeur vers la surface.

IV.4.1.1.3.2 Modélisation du flux par la méthode isotopique.

Vu le faible effet anisotherme, le modèle isotherme à une température de 30°C est adopté (Annexe 4). Une estimation des flux relatifs est (Eq.28) :

avec :

$N_{\text{sat}}=$	$30,4 \cdot 10^{-3}$	kg.m^{-3}	M.L^{-3}
$D^v=$	$0,264 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	$\text{L}^2.\text{T}^{-1}$
$D^l=$	$3 \cdot 10^{-9}$	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	$\text{L}^2.\text{T}^{-1}$
$\text{moy}_z(W)=$	9,5%		sans dimension
$d=$	1000	kg.m^{-3}	M.L^{-3}
$P=$	34%		sans dimension

$$\text{d'où } Q^v/Q^l \approx 0,69$$

Donc, sans être dominant le flux en phase vapeur reste significatif. La relation à employer est donc celle du transfert mixte en conditions isothermes (Eq.25).

Le calcul de la fonction de pondération (Eq.27, Annexe 4) montre une relation linéaire avec le logarithme réduit des teneurs avec une pente de $5,407\text{m}^{-1}$, pour une température de 30°C, l'évaporation estimée (Eq.29, Annexe 4) avec:

$\tau = 0,67$ (valeur empirique pour la tortuosité d'un sable (Bear,1972))

$$\text{est de } 1 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1} \text{ soit } E = 32,5 \text{ mm.an}^{-1}$$

IV.4.1.1.4 Profil des teneurs en chlorures.

IV.4.1.1.4.1 Description.

Le profil (Fig.58) présente très nettement lui aussi une allure exponentielle, et la teneur de la base du profil ($2,8 \text{ meq.l}^{-1}$) se rapproche de la teneur de la nappe mesurée dans un puits assez proche du profil ($2,56 \text{ meq.l}^{-1}$, (SG19)). Les teneurs atteignent $17,9 \text{ meq.l}^{-1}$ ce qui représente une concentration relative de 6,4.

IV.4.1.1.4.2 Modélisation.

Le calcul de la masse des chlorures, due à la concentration de la nappe, fait apparaître une masse de 660 meq.m^{-2} (Annexe 5) ce qui correspond à un flux de **275mm** d'eau à une teneur de $2,4 \text{ meq.l}^{-1}$ dans le profil.

L'examen du Bulletin Annuel de la Météorologie Nationale pour l'année 1986 montre que, en remontant dans le temps, les valeurs des pluviométries mensuelles sont inférieures à 45 mm depuis le mois de février (pour la station la plus proche) avec un total de 86 mm. Il en est de même pour les pluies journalières qui sont inférieures à 22 mm depuis ce même mois. Dans ces conditions, et du fait que les valeurs mensuelles de l'E.T.P. sont supérieures à 100 mm (Bargeas, 1984), il est très probable qu'aucun ion chlorure n'ait quitté le profil depuis une période d'environ **225 jours**. Il est alors possible de calculer un taux moyen d'évaporation avec :

-275mm la quantité d'eau fournie par la nappe,

-86 mm la quantité d'eau fournie par la pluie (sans apport conséquent de chlorures

(Cf.§III)).

Ceci conduit à une hauteur totale évaporée de **361mm** sur une période de **225jours** soit un taux moyen d'évaporation de **1,6mm.j⁻¹** où bien une évaporation moyenne (E.T.R. sur la saison sèche) de **585mm.an⁻¹**. Ce qui est du même ordre de grandeur que la valeur moyenne calculée pour l'année (750mm) avec un bilan de Thornwhaite (avec une réserve utile de 50mm) (Bargeas, 1984).

Si l'on s'intéresse uniquement au débit d'eau fourni par la nappe, et que l'on suppose qu'immédiatement après le lessivage la valeur d'évaporation est proche de l'E.T.P., il est alors possible de caler un modèle logarithmique (Eq.36).avec:

$E(t_0)=5$ (E.T.P.journalière)	mm.j ⁻¹	L.T ⁻¹
ET=275 (lame d'eau totale évaporée)	mm	L,
T=225 (temps écoulé depuis le dernier lessivage)	j	T.

On obtient l'égalité (Eq.37) :

$$0,01818... = K / (1 - e^{(-K \cdot 225)}),$$

qui s'avère vérifiée, à 10^{-9} près, pour $K=0,017854506$.

L'application donne alors, l'équation (Eq.36):

$$E(t) = 5 \cdot e^{(-0,01785 \cdot t)}$$

donc $E(225)=0,09\text{mm.j}^{-1}$ ce qui correspond à **32,8mm.an⁻¹**. Bien entendu la coïncidence entre les deux valeurs, celle obtenue par le bilan isotopique, et celle obtenue par le bilan en ions chlorures, ne signifie pas l'adaptation absolue de l'évaporation de nappe à la loi logarithmique, néanmoins, les ordres de grandeurs sont respectés.

IV.4.1.2 Profil de S^t Paul.

IV.4.1.2.1 Situation et pédologie.

Le profil de S^t Paul est situé sur le terrain qui entoure le stade Omnisport de la commune de S^t Paul (Annexe 6). Le profil est constitué de sables basaltiques alluvionnaires (Fig.59) avec une granulométrie très disparate du galet de 20 cm de diamètre aux sables millimétriques. La présence d'éléments grossiers ayant empêché la progression à la tarière, le profil a été essentiellement effectué à la main, ce qui explique que la nappe, qui se situe à une profondeur proche de 4 m, n'ait pas été atteinte. Seule la fraction inférieure à 5 cm de la granulométrie a été échantillonnée. La surface du terrain est dépourvue de végétation.

IV.4.1.2.2 Teneurs volumiques en eau (Fig.60).

Les teneurs volumiques en eau sont très faibles et relativement constantes sur tout le profil; la légère augmentation en base de profil laisse suggérer que la nappe n'est plus très loin. La teneur volumique moyenne est de 4,7%. La porosité est extrêmement difficile à estimer, vu l'hétérogénéité du matériel, la valeur de 35% est choisie.

Remarque: la valeur de 35% est cohérente avec un essai de saturation du sol tassé dans une boîte de pédologue. Bien entendu cette valeur ne tient pas compte des gros galets.

IV.4.1.2.3 Profil isotopique (Fig.61).

Les teneurs en ¹⁸O de l'eau du sol se développent comme celles du profil théorique anisotherme. Il existe donc à S^t Paul une région de transfert vapeur et de diffusion au contact de l'atmosphère, hélas la modélisation bâtie sur les deux points définissant cette zone, serait trop hasardeuse.

L'effet thermique est évident puisque les valeurs de la partie médiane s'inscrivent en dessous de celles de la base du profil d'environ 2‰ vs SMOW. Ceci n'est guère surprenant lorsque l'on connaît les propriétés absorbantes, vis-à-vis du rayonnement solaire, des alluvions basaltiques qui sont très sombres. En effet, il est fréquent, en milieu de journée, d'atteindre des températures de surface d'environ 50°C. La teneur à la base du profil est cohérente avec les teneurs observées dans la nappe.

IV.4.1.2.4 Modélisation.

Le modèle utilisé est celui du transfert mixte anisotherme avec un profil de température exponentiel qui débute à 50°C pour atteindre 25°C (moyenne interannuelle) en base de profil (Eq.30, Annexe7).

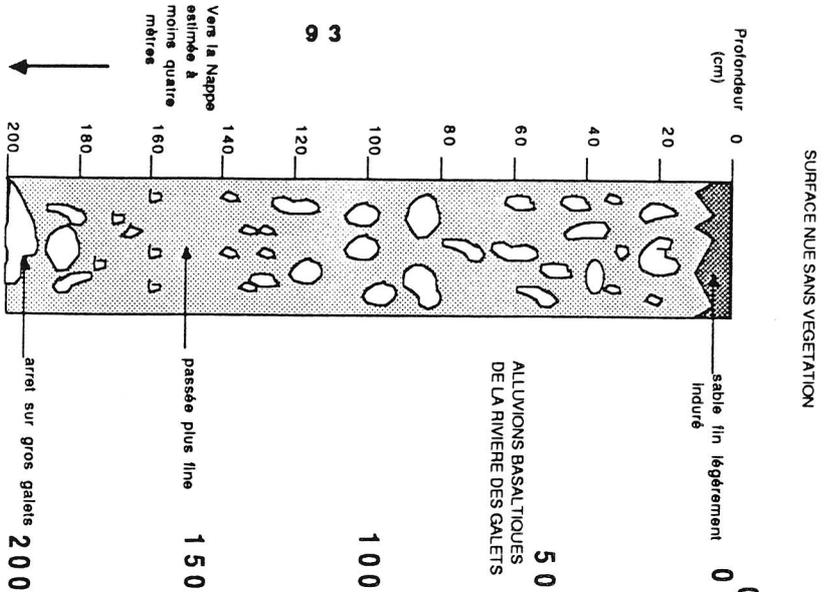


Fig.59: Lithologie du profil St Paul. La nappe n'est pas rencontrée mais est supposée à 4m de profondeur (niveau de l'étang de St Paul), le terrain est plat.

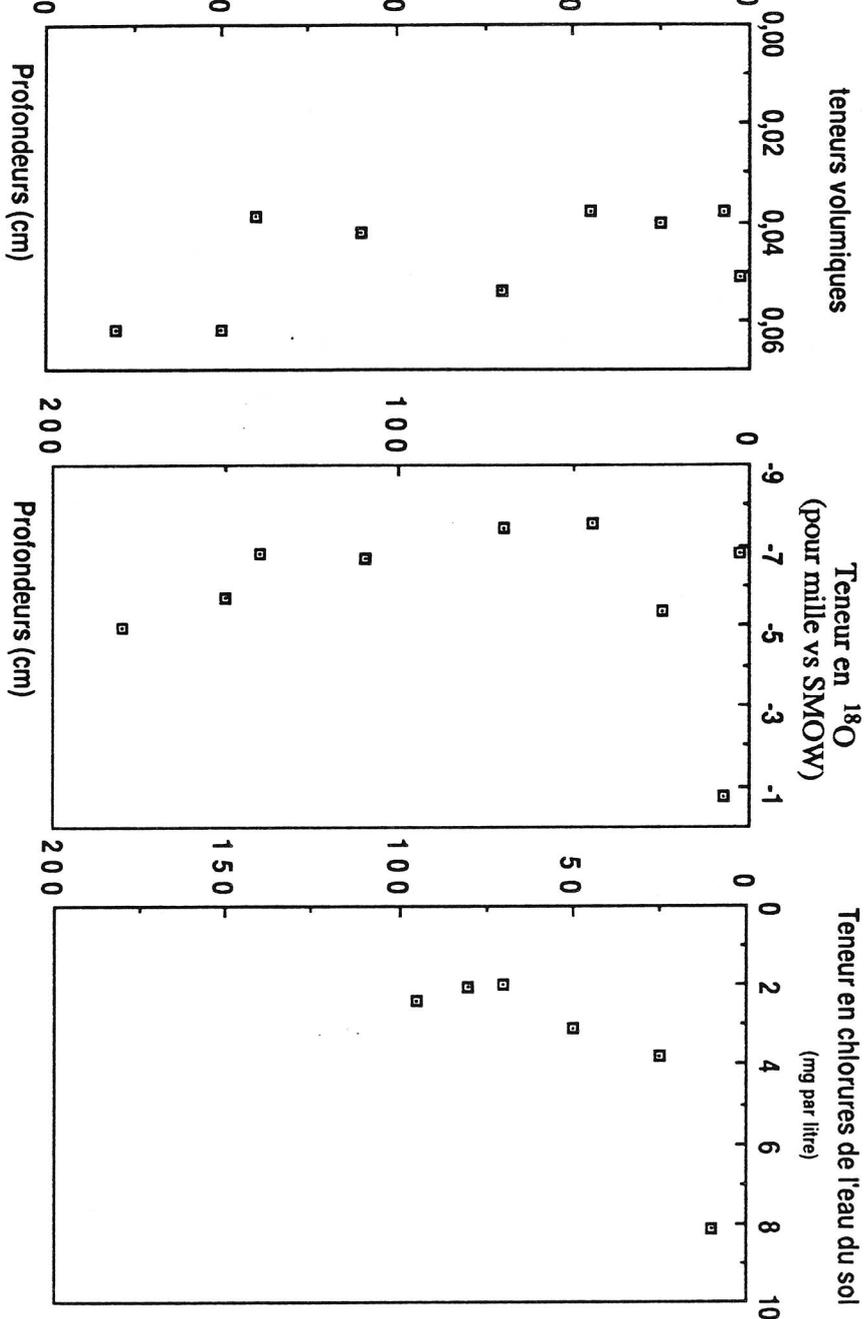


Fig.60: Profil des teneurs volumiques en eau du sol de St Paul. Les teneurs sont assez constantes.

Fig.61: Profil des teneurs en ^{18}O (en ‰ vs SMOW) de l'eau du sol de St Paul. Le profil montre une forte similitude avec le profil théorique, avec un fort effet anisotherme.

Fig.62: Profil des teneurs en Cl^- (mg.l⁻¹) de l'eau du sol de St Paul. Le profil montre une tendance exponentielle à l'enrichissement de la profondeur vers la surface.

L'ajustement est bon pour un transfert avec une valeur de $Z_v / (Z_v + Z_l)$ proche de 1 et une distance Z_v égale à **0,7m**, ce qui suppose un transfert s'opérant très majoritairement en phase vapeur.

Dans ces conditions l'expression du flux vapeur est :

$$E = N_{\text{sat}} \cdot S_d \cdot \tau \cdot D^v / (d \cdot Z^v), \quad (29)$$

où :

$N_{\text{sat}} = 0,0304$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{M} \cdot \text{L}^{-3}$,
$D^v = 0,264 \cdot 10^{-4}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{L}^2 \cdot \text{T}^{-1}$,
$Z^v = 0,7$	m	L ,
$S_d = 0,303$		sans dimension,
$\tau = 0,67$		sans dimension,
$d = 1000$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{M} \cdot \text{L}^{-3}$,

alors, $E = 2,3310^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ soit **7,3mm.an⁻¹**.

IV.4.1.2.5 Profil des ions chlorures (Fig.62)

Le profil présente nettement une allure logarithmique jusqu'à la profondeur de 70 cm où les teneurs se stabilisent. En prolongeant les teneurs constantes jusqu'à la nappe, estimée à 4m de profondeur, on trouve une quantité d'ions chlorures de **423 meq.m²** (Annexe 8) ce qui, avec une alimentation à une teneur de **2 meq.l⁻¹**, correspond à une hauteur d'eau évaporée de **211,5 mm** d'eau. Les mêmes hypothèses qu'à S^t Gilles concernant le lessivage sont appliquées, (les deux profils sont dans la même région climatique). Le profil a été réalisé le 17/8/86 soit 56 jours avant celui de S^t Gilles. Il s'est donc écoulé **169 jours** depuis le dernier lessivage. Pendant cette période, il a plu 144 mm sans excéder 70mm par mois et 40 mm par jour.

Si l'on suppose qu'aucun ion chlorure n'a quitté le profil depuis le mois de février, **355,5 mm** (211,5+144) ont été évaporés, soit une E.T.R.moyenne de **768 mm.an⁻¹** (2 mm.j⁻¹). Ce résultat est identique à la valeur d'E.T.R. moyenne pour l'année trouvé par Bargeas (1984) avec une R.U. de 50mm.

Si l'on s'occupe uniquement du flux en provenance de la nappe en appliquant le modèle exponentiel (Eq.36), avec :

$E(t_0) = 5$	$\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$	$\text{L} \cdot \text{T}^{-1}$,
$ET = 211,5$	mm	L ,
$T = 169$	j	T ,

on aboutit à l'expression (Eq.37)

$5/221,5 = K / (1 - e^{(-K \cdot 169)})$ qui se trouve vérifiée , à 10^{-9} près , pour $K = 0,023169563$.

Le report de K dans l'équation de décroissance (Eq.36) :

$$E(t) = 5 \cdot e^{(-0,02317.t)}$$

fournit pour T=169 la valeur : $E(169)=0,099 \text{ mm.j}^{-1}$ soit **36,4mm.an⁻¹**.

Le modèle logarithmique basé sur la masse d'ions chlorures stockée sur le profil conduit donc à une valeur d'évaporation surestimée par rapport au modèle isotopique. Les causes d'un tel décalage peuvent être multiples. Tout d'abord, la quantité d'ions chlorures dans le profil est estimée à partir des densités volumiques mesurées sur la partie fine du matériel, sans tenir compte des gros galets (qui du fait de leurs surfaces spécifiques moindres contiennent moins d'ions chlorures que leur équivalent volumique en sable), ceci conduit à une surestimation de la lame d'eau évaporée et par conséquent à une sous estimation du facteur de calage K.

Pour que l'estimation de l'évaporation au temps 169j soit égale à $7,3 \text{ mm.an}^{-1}$, il aurait fallu un facteur K (avec $E(T)=5 \cdot \exp(-k.T)$, $k=-\ln(E(T)/5)/T$, $E(T)=0,02 \text{ mm.j}^{-1}$ pour T=169 j) égal à 0,0327 ce qui induit une lame évaporée de 152 mm. Or 152 mm est plus proche de la lame d'eau équivalente aux ions chlorures stockés dans les **deux premiers mètres** (123 mm). Il est donc possible que le lessivage n'ait été que partiel.

Remarque : Cette éventualité n'est pas à rejeter, du fait de la profondeur de la nappe (4m). Quelle lame d'eau est-elle nécessaire pour lessiver 4 m de sables, c'est à dire, entraîner tout les ions chlorures à la nappe ? Cette quantité est difficile à estimer du fait de l'incertitude sur le modèle rendant compte du déplacement des solutions, (importance relative entre dispersion et convection, intervention de la reprise évaporatoire après le lessivage ...).

IV.4.1.3 Profil d' Etang Salé.

IV.4.1.3.1 Situation et pédologie.

Le profil est situé à proximité du lieu dit "Etang Salé Les Bains" (Annexe 9) à environ 300 m du bord de mer. Le terrain est plat, recouvert d'une forêt de pins, le profil a été effectué dans une clairière où domine une végétation herbacée jaunie au moment du prélèvement. Le profil est exclusivement formé d'un sable basaltique (Fig.63) assez fin à nombreux fragments d'olivines. La nappe phréatique est rencontrée à 1m de profondeur.

IV.4.1.3.2 Teneurs volumiques en eau.

Les teneurs volumiques en eau montrent (Fig.64) un profil typique d'évaporation de nappe. La connaissance de la saturation à 1m de profondeur permet de calculer une porosité de 35%. Les teneurs sont plus faibles en surface qu'à S^t Gilles, ce qui semblerait montrer que la succion matricielle est moindre dans le sable basaltique que dans le sable corallien. La teneur volumique moyenne s'établit à 8,8%.

IV.4.1.3.3 Profil des teneurs en ¹⁸O.

IV.4.1.3.3.1 Description du profil.

Les teneurs isotopiques croissent du bas vers le haut avec une allure exponentielle et aucun effet thermique n'est remarqué (Fig.65).

De même, il n'est pas détecté de zone de transfert en phase vapeur en haut du profil. Par contre, le profil est perturbé pour la profondeur -0,35 m, peut-être à cause des implantations racinaires. La teneur de bas de profil est de -6 ‰ et l'enrichissement total du bas vers le haut est de 10 ‰.

IV.4.1.3.3.2 Modélisation.

Le rapport qui permet d'estimer l'importance relative des flux liquide et vapeur (Eq.28) est appliqué

avec :

$N_{sat}(30^{\circ}C)=30,4 \cdot 10^{-4}$	(saturation en eau de l'air à 30°C)	$kg \cdot m^{-3}$	$M \cdot L^{-3}$,
$D^V(30^{\circ}C)=0,264 \cdot 10^{-4}$	(coefficient de diffusion en phase vapeur)	$m^2 \cdot s^{-1}$	$L^2 \cdot T^{-1}$,
$D^L(30^{\circ}C)=3 \cdot 10^{-9}$	(coefficient de diffusion en phase liquide)	$m^2 \cdot s^{-1}$	$L^2 \cdot T^{-1}$,
$moy_z(W)=8,8\%$	(moyenne des teneurs volumique en eau)	sans dimension,	
$d=1000$	(masse volumique)	$kg \cdot m^{-3}$	$M \cdot L^{-3}$,
$P=35\%$	(porosité)	sans dimension	

le résultat est $Z^V/Z^L \approx 0,79$.

De la même façon que précédemment le flux vapeur sans être dominant reste significatif; le modèle isotherme de transfert mixte est donc applicable. Le calcul de la fonction de pondération ($\xi(z)$)

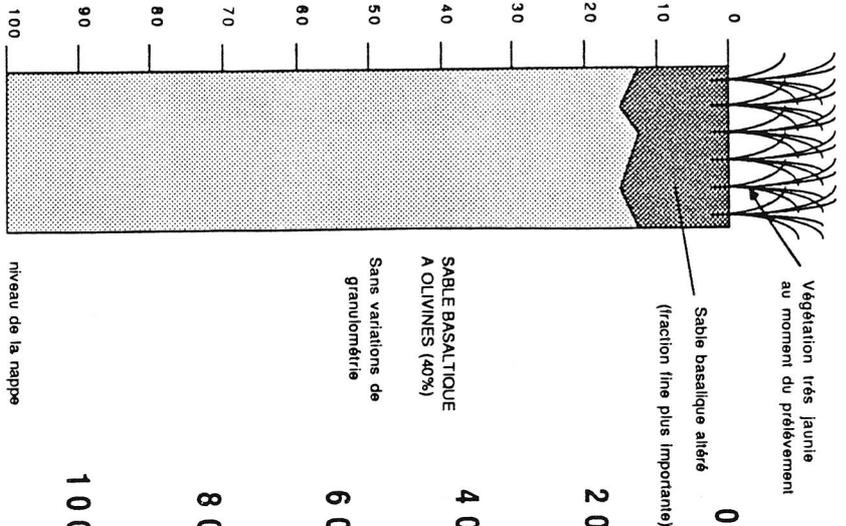


Fig.63 : Lithologie du profil d'Etang Salé. La nappe est rencontrée à 1,1 m, le terrain est plat.

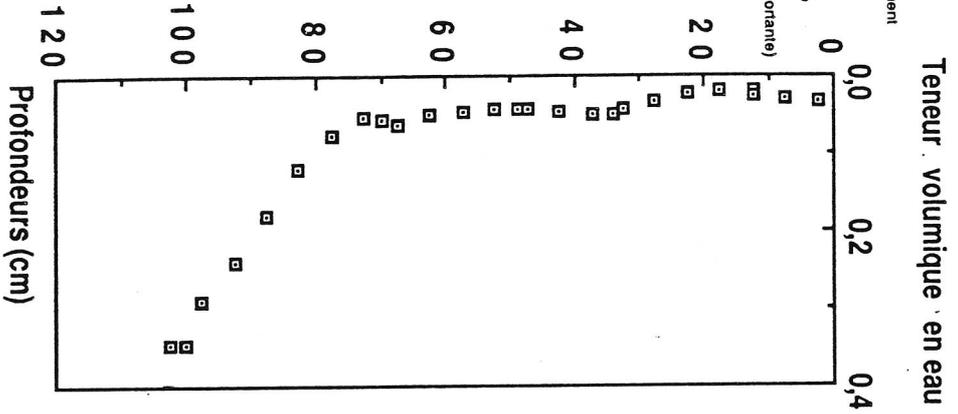


Fig.64: Profil des teneurs volumiques en eau du sol d'Etang Salé. Les teneurs décroissent selon une allure exponentielle de la nappe à la surface

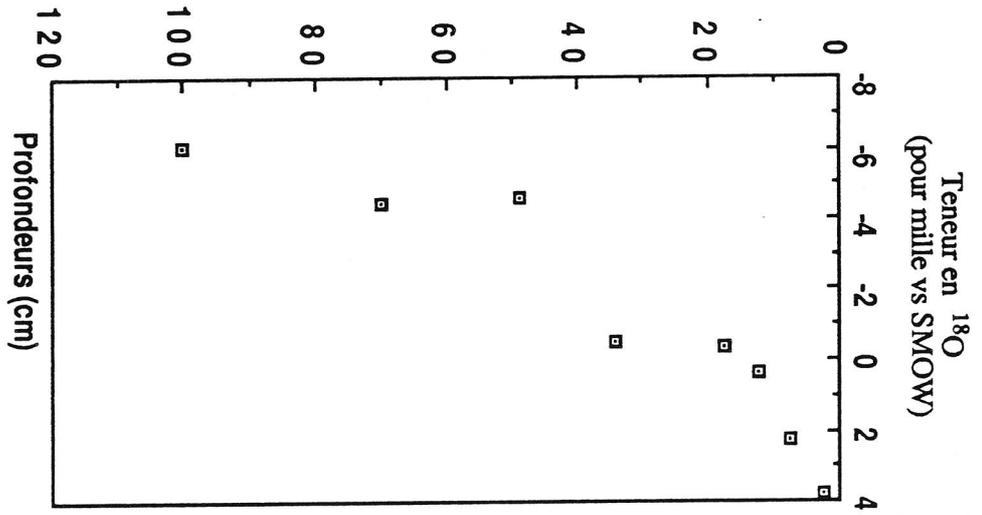


Fig.65: Profil des teneurs en 18O (en ‰ vs SMOW) de l'eau du sol d'Etang Salé. Le profil montre une tendance exponentielle à l'enrichissement de la nappe vers la surface avec une perturbation minime du profil vers 30cm de profondeur.

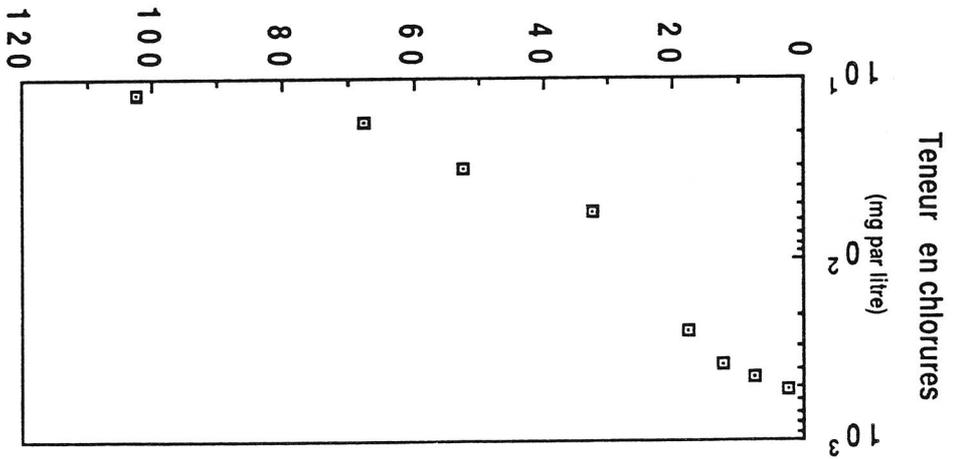


Fig.66: Profil des teneurs en Cl⁻ (mg.l⁻¹) de l'eau du sol d'Etang Salé. Le profil montre une tendance exponentielle à l'enrichissement de la nappe vers la surface.

(Eq.26, Annexe 10) montre que le calage est linéaire jusqu'à 0,7m. La pente de la corrélation entre $\xi(z)$ et le logarithme réduit des teneurs est de $12,55\text{m}^{-1}$.

Le taux d'évaporation (Eq.29), (avec $\tau=0,67$)

est de $2 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$, soit 70mm.an^{-1} .

IV.4.1.3.4 Profil de teneurs en ions chlorures.

V.4.1.3.4.1 Description du profil.

Le profil présente une allure logarithmique (Fig.66) avec une teneur de la base à $12,2 \text{ meq.l}^{-1}$ et une teneur de sommet de $515,3 \text{ meq.l}^{-1}$. Ces fortes teneurs ne doivent pas surprendre, en effet, à 100m du lieu de prélèvement, dans un secteur où la nappe est quasi-affleurante, il se forme des croûtes de sel en surface.

Le prélèvement chimique dans le puit le plus proche (E.S. 29) montre des teneurs similaires à celles de base de profil.

V.4.1.3.4.2 Modélisation de l'évaporation.

Le bilan en ions chlorures effectué de la surface à la nappe montre une quantité d'ions chlorures de 4174 meq.m^2 (Annexe 11). Cette quantité correspond à une lame d'eau évaporée de 342mm avec une concentration de l'eau de $12,2 \text{ meq.l}^{-1}$.

L'examen du Bulletin Annuel 1986 de la Météorologie Nationale montre que pour le poste pluviométrique le plus proche, il n'y a pas de mois avec plus de 64 mm et de jour de pluie avec plus de 30 mm depuis la mi-mars.

Dans ces conditions, l'on peut admettre qu'aucun ion chlorure n'a quitté le profil depuis **208 jours**. Pendant ce temps il a plu **215 mm**. L'E.T.R. calculée est donc de 557mm ($342+215$), pendant 208 jours, ce qui conduit à une valeur moyenne de $2,68 \text{ mm.j}^{-1}$, soit $977,4 \text{ mm.an}^{-1}$, cette valeur est supérieure à celle donnée pour l'année par un bilan de Thornwhaite avec une R.U. de 50 mm (Bargeas, 1984).

Si l'on s'intéresse uniquement au débit d'eau fourni par la nappe et que l'on suppose immédiatement après le lessivage, la valeur de l'évaporation proche de l'E.T.P., il est alors possible de caler un modèle logarithmique (Eq.36).

Il vient de l'équation (Eq.37), avec :

$E(t_0)=5$	(évaporation potentielle journalière)	mm.j^{-1}	$L.T^{-1}$,
$ET=342$	(lame d'eau évaporée)	mm	L ,

T=208 (temps depuis le dernier lessivage)

j

T,

$$0,014619883 = K / (1 - e^{(-K \cdot 208)})$$

cette équation est vérifiée à 10^{-9} près pour $K=0,013789465$.

Le report de la constante K dans l'équation générale (Eq.36) donne:

$$E(t) = 5 \cdot e^{(-0,01379 \cdot t)}$$

or $E(208)=0,284 \text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$ soit **$103,7 \text{mm} \cdot \text{an}^{-1}$** .

Cette valeur est supérieure à celle donnée par la méthode isotopique mais du même ordre de grandeur.

IV.4.2 Profils en situations d'excédents hydriques.

IV.4.2.1 Introduction.

Sur les quatre profils effectuées dans des lieux à excédents hydriques annuels, trois présentent les marques **d'une évaporation** affectant leurs horizons supérieurs. Il s'agit des profils de **Trois Bassins, Beaumont et La Montagne** qui montrent vers la surface des humidités volumiques nettement inférieures à celles observées en profondeur, et des tendances affirmées à l'enrichissement en ^{18}O au fur et à mesure que l'on se rapproche de la surface du sol.

Remarque : une humidité volumique inférieure vers la surface du sol n'est pas forcément l'indice d'un dessèchement, en effet, dans les andosols il peut exister des causes structurales à cet état de fait (Rosselo, 1984).

Le profil de Grand Etang ne présente aucune de ces caractéristiques. Il est vrai qu'il est situé dans une région où le bilan hydrique de surface est très excédentaire, même à la date de prélèvement du profil. Dans l'exposé qui suit, il est choisi de commenter séparément, les profils de teneurs volumiques en eau et de teneurs isotopiques, des profils des concentrations en Cl^- .

IV .4.2.2 Profil de Trois Bassins.

IV.4.2.2.1 Situation et pédologie.

Le secteur (Annexe 12) présente un intérêt particulier, puisqu'il s'agit d'un site expérimental de l'Institut de Recherche en Agronomie Tropicale (I.R.A.T.), et du Laboratoire de Géographie Physique de l'Université de la Réunion, qui suivent l'évolution de nombreux paramètres relatifs aux sols et au climat. A une altitude de 1020m, avec une moyenne des précipitations de 1681mm.an^{-1} et une E.T.P. estimée à 972mm.an^{-1} , le site de Trois Bassins est décrit par Vaksman (1987) comme un andosol développé sur des cendres et des cinérites (Fig.67). Ce type de sol favorise une morphologie à vastes ondulations avec des pentes de 5 à 10%. L'érosion est réputée faible dans les conditions naturelles et le drainage très bon. La conductivité hydraulique décroît exponentiellement avec la succion du sol d'une manière similaire à celle d'un sable "L'eau excédentaire aura donc tendance à percoler rapidement en période cyclonique" (Vaksman, 1987) (Annexe 13). Le suivi du stock hydrique par humidimétrie neutronique effectué par le même auteur, à une profondeur de 1 m pendant les années 1985 et 1986, permet d'estimer une réserve à la capacité au champ de 490 mm et un minima à 360 mm. Finalement, malgré des réserves importantes seuls 130mm.m^{-1} peuvent être attribués à la Réserve Utilisable par les plantes (R.U.). Les humidités volumiques semblent toujours plus faibles en surface (entre 25 et 45 %)

qu'en profondeur.

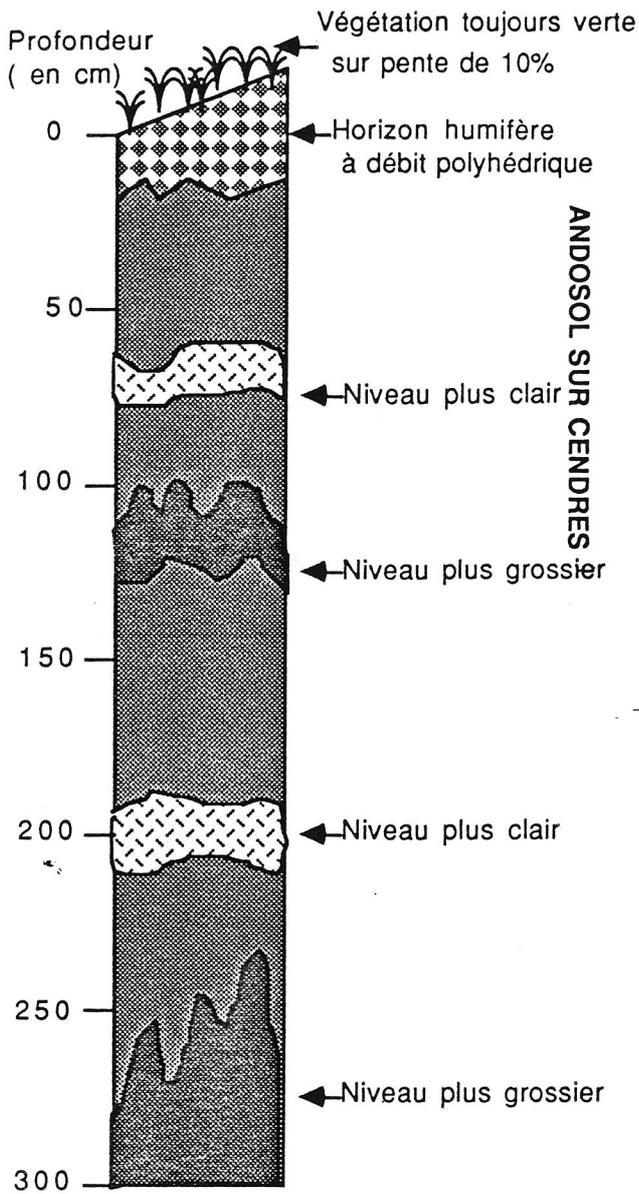


Fig.67: Lithologie du profil de Trois Bassins. Le profil se résume en une série d'andosols successivement rajeunis par les dépôts cendreux.

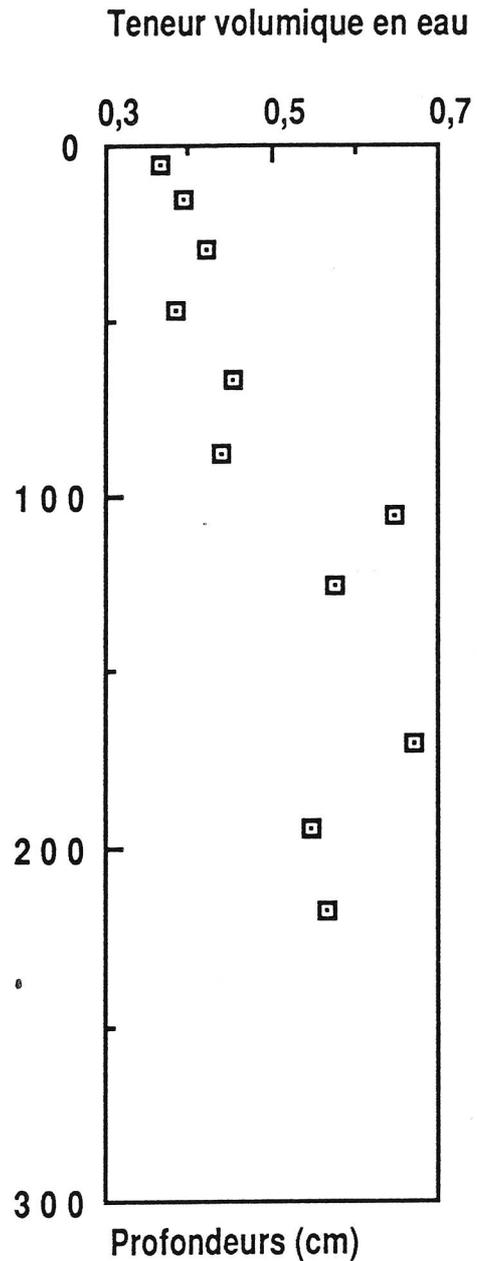


Fig.68: Profil des teneurs volumiques en eau du sol de Trois Bassins.

Le sol présente un niveau de surface moins humide que la profondeur où les teneurs sont proches de 0,6, soit dans le profil un stock de 1000mm d'eau.

Le profil effectué le 16/10/86 jusqu'à 2,7 m montre une succession de niveaux de cendres très altérés et de niveaux partiellement atteints par la pédogénèse. C'est le profil typique d'un andosol sur cendres qui montre une succession de paléosols rajeunis par des dépôts cendreux.

IV.4.2.2 Teneurs volumiques en eau du profil.

Les teneurs volumiques en eau sont assez fortes, (Fig.68) ce qui est conforme, aux travaux de Rosello (1984) et Vaksmann (1987).

Remarque : Il est d'usage en pédologie de raisonner sur les humidités volumiques par rapport au volume du sol sec ce qui conduit pour les sols très humides comme les andosols à des valeurs supérieures à 100%. Nous préférons raisonner en humidité volumique par rapport au volume du sol humide, ce qui est cohérent avec les modèles d'estimations de flux que nous utilisons.

De la surface jusqu'à un mètre les teneurs sont proches de 0,4 pour s'élever jusqu'à 0,65 en profondeur. La porosité est estimée égale à 0,66, teneur maximale qui correspond à la saturation apparente du milieu (Cf. § II.1.2.4).

Il faut insister sur l'importance de ce stock qui peut être estimé à plus de 1000 mm uniquement pour les 2,5 premiers mètres. En considérant que dans la plupart des secteurs, le couvert cendreux atteint 5m, l'on aurait alors une réserve d'eau de 2m, ce qui est **largement supérieur aux précipitations annuelles.**

IV.4.2.3 Teneurs en ^{18}O de l'eau du sol.

Le profil présente une allure complexe (Fig.69), les teneurs s'appauvrissent de la surface (-5,45 ‰ SMOW à 0,05m) jusqu'à la profondeur 0,87 m (-11,11 ‰). A une profondeur plus grande, les teneurs se stabilisent autour de -7 ‰, pour décroître à -8,4 ‰ à 2,175 m. La décroissance rapide en surface peut être expliquée par l'effet de l'évaporation juste avant le prélèvement du profil. Les teneurs plus faibles en profondeur sont à relier aux teneurs de la saison des pluies 1985-1986 qui leur sont, en moyenne, légèrement supérieures (-6,11 ‰). La teneur la plus faible (-11,11 ‰) pourrait être expliquée par une pluie cyclonique particulièrement appauvrie en isotopes lourds.

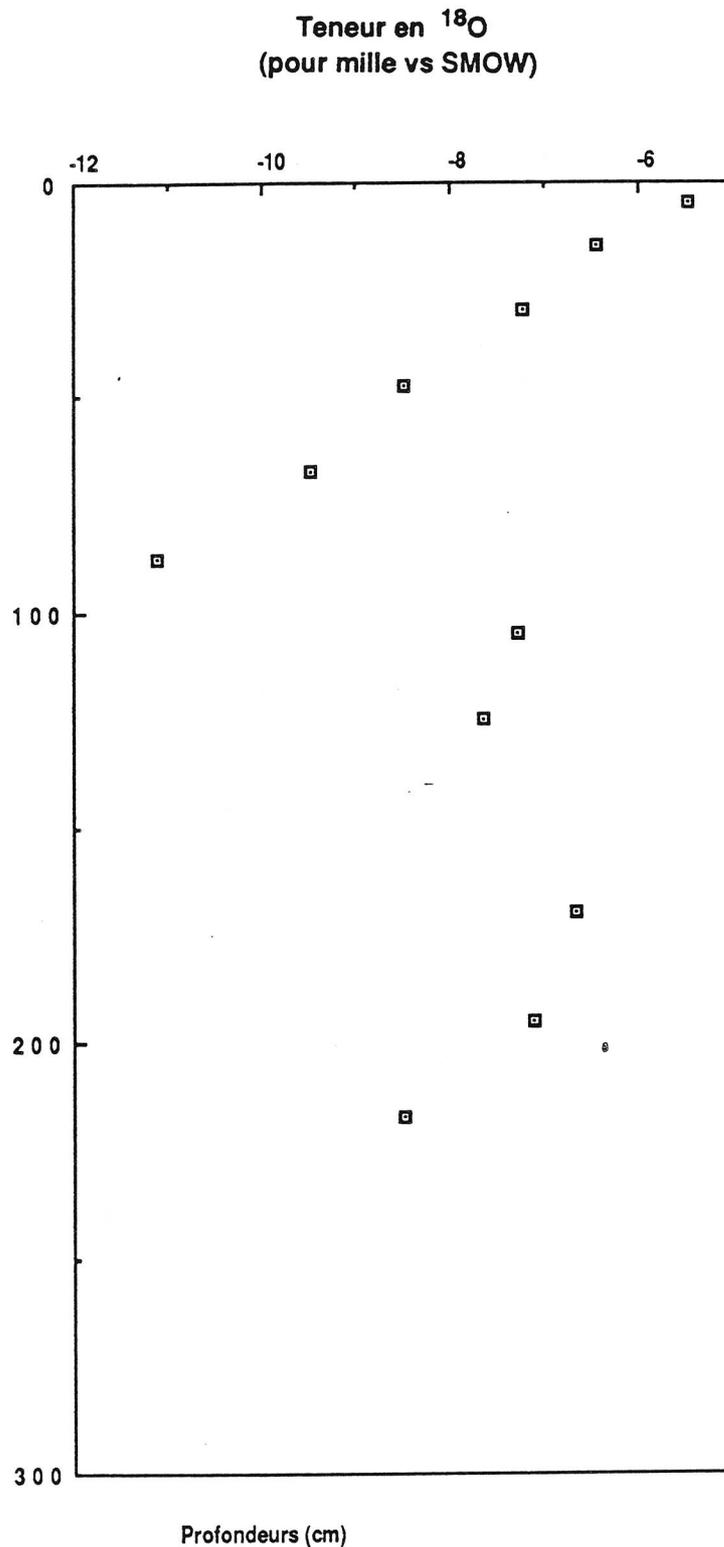


Fig.69: Profil des teneurs en ^{18}O (en ‰ vs SMOW) de l'eau du sol de Trois Bassins. Le profil présente en surface une diminution des teneurs attribuée à l'effet de l'évaporation. En profondeur les pics négatifs sont à rattacher aux épisodes de pluies cycloniques violentes.

IV.4.2.2.4 Modélisation de l'évaporation.

La modélisation n'est bien entendue possible que pour le premier mètre (Annexe 14 & 15), où les teneurs décroissent, le calcul du rapport Z^v/Z^l (Eq.28) avec :

$P=0,66$	(porosité)	sans dimension,	
$\text{moy}(W)=0,436$	(teneur volumique moyenne)	sans dimension,	
$D^l=2,3 \cdot 10^{-9}$	(Coefficient de diffusion en phase liquide)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{L}^2 \cdot \text{T}^{-1}$,
$D^v=0,254 \cdot 10^{-4}$	(Coefficient de diffusion en phase vapeur)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{L}^2 \cdot \text{T}^{-1}$,
$N_{\text{sat}}=0,023$	(saturation de l'air en eau)	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.	$\text{M} \cdot \text{L}^{-3}$.

donne une valeur de **0,12**, ce qui signifie que le transfert en phase liquide est dominant. La fonction de calage pour le modèle isotherme à transfert mixte $\xi(z)$ (Eq.26) donne une pente de **2,12** avec le logarithme des teneurs réduites, soit une estimation de l'évapotranspiration (Eq.29, Annexe 14) égale à **45mm.an⁻¹**.

La fonction de calage pour le modèle isotherme à transfert liquide $\xi(z)$ (Eq.27) donne une pente de **9,55** avec le logarithme des teneurs réduites soit une estimation de l'évapotranspiration (Eq.29, Annexe 15) égale à **30mm.an⁻¹**.

Il semblerait donc qu'un transfert significatif en phase vapeur se produise, la valeur de **45mm.an⁻¹** serait alors la meilleure.

IV.4.2.2.4 L'infiltration.

La comparaison des teneurs des pluies et des teneurs des sols semble montrer que l'eau contenue dans le sol est appauvrie en ¹⁸O par rapport aux pluies. L'explication réside peut-être dans le fait que, comme nous l'avons montré dans le chapitre III, les pluies présentent un fort "effet de masse". Il est donc probable que seules les fortes pluies échappent à l'évaporation et rejoignent les couches inférieures du sol. En tous cas, seules les pluies de la saison cyclonique semblent s'infiltrer. Enfin, pour expliquer les teneurs les plus appauvries (**-11 et -8,68 ‰ vs SMOW**) du profil, il faut avoir recours à des épisodes de précipitation particulièrement violents. La chronique des précipitations indique comme journées particulièrement pluvieuses, dans un contexte de pluies cycloniques, les jours suivants:

le 7 février 1986 (210mm.j⁻¹)

le 24 février 1985 (240mm.j⁻¹)

le 16 janvier 1985 (560mm.j⁻¹).

Si l'on associe:

- au pic négatif des teneurs à -0,87m la pluie du 7 février 1986,

- au pic négatif de bas de profil (-2,25m) la pluie du 24 février 1985,

et sachant qu'entre ces deux points la quantité d'eau contenue dans le profil est d'environ **680 mm**, alors que la lame d'eau précipitée pendant ces **352 jours**, est d'environ **1030 mm**, on obtient une infiltration de **66 %** (soit une composante ruissellement et évaporation égale à

1mm.j⁻¹, nettement inférieure à ETP.).

De même entre la date du 7 février 1986 et le prélèvement il est tombé **880 mm**, alors que la quantité d'eau dans le profil entre -0,875 m et la surface est de **457 mm**. Le taux d'infiltration serait donc de **52%**. Cette constatation conduirait à une lame évaporée et ruisselée de **423 mm**, pendant **245 j** soit **1,73 mm.j⁻¹** soit **52,5 mm.mois⁻¹**. Cette valeur est du même ordre de grandeur que E.T.P. estimée sur le site (Bargeas, 1983).

IV.4.2.3 Profil de Beaumont.

IV.4.2.3.1 Situation et pédologie.

Comme le site de Trois Bassins, le profil de Beaumont (Annexe 16) a été effectué à proximité de parcelles expérimentales gérées par le Laboratoire de Géographie Physique de l'Université de la Réunion, dans le cadre d'une étude sur le ruissellement et le transport solide. Le site est à 1105 m d'altitude sur le versant nord-est de l'île. Le profil recoupe des "sols fortement désaturés, humifères, gibbsitiques", "localement hydromorphes sur des matériaux volcaniques indifférenciés" (Bougère & Gopal, 1985). La géomorphologie est caractérisée par des interfluves plats isolés par les incisions des ravines qui atteignent rarement plus de 10 m de profondeur.

Le profil pédologique a été effectué sur le bord d'un interfluve, et comme à Trois Bassins se développe typiquement comme un andosol sur cendres (Fig.70). Des niveaux remarquables de "rajeunissement" se remarquent, soit par leur couleur différente généralement plus claire, comme le niveau de tuf jaune (Bachelery, 1981; Rosello, 1984), soit par des changements de taille du matériel qui devient brusquement plus grossier. Le site est beaucoup plus arrosé qu'à Trois Bassins puisqu'en 1985, il est tombé **6045 mm**, pour une E.T.P. estimée proche de **1100 mm** (Bargeas, 1984). Le bilan de surface effectué sur une parcelle recouverte de végétation sur une pente de 8% fait apparaître une infiltration de **89%** de la pluie tombée (Bougère & Gopal, 1985).

IV.4.2.3.2 Profil des teneurs volumiques en eau (Fig.71).

Les teneurs volumiques en eau sont plus élevées à Beaumont qu'à Trois Bassins, puisque la valeur moyenne s'établit à **58%**. Le profil des teneurs est très irrégulier, mais une tendance se dessine entre des teneurs plus faibles de la surface jusqu'à -0,5m proches de **45%**, et des teneurs plus fortes en profondeur, atteignant **90%** au point -2,3 m. Cette valeur de teneur en eau volumique est prise comme égale à la porosité, le niveau étant considéré comme proche de la saturation. Les fortes teneurs en eau impliquent que le profil contient une quantité appréciable d'eau puisque la quantité stockée est de **2274 mm** entre -3,7 m et la surface.

IV.4.2.3.3 Teneurs en ^{18}O . (Fig.72)

Le profil des teneurs est très irrégulier, de la surface à -0,8 m, les teneurs décroissent de **-6,5** à **-8,7 ‰ vs SMOW**. Plus bas, les teneurs sont généralement proches des teneurs des pluies de la saison cyclonique (**-4,8 ‰ vs SMOW**) si l'on excepte des pics négatifs aux horizons -1,67 m et -3,7 m. L'infiltration est donc le fait des pluies de saison cyclonique et il se produit probablement un effet d'évaporation dans les premiers horizons du sol.

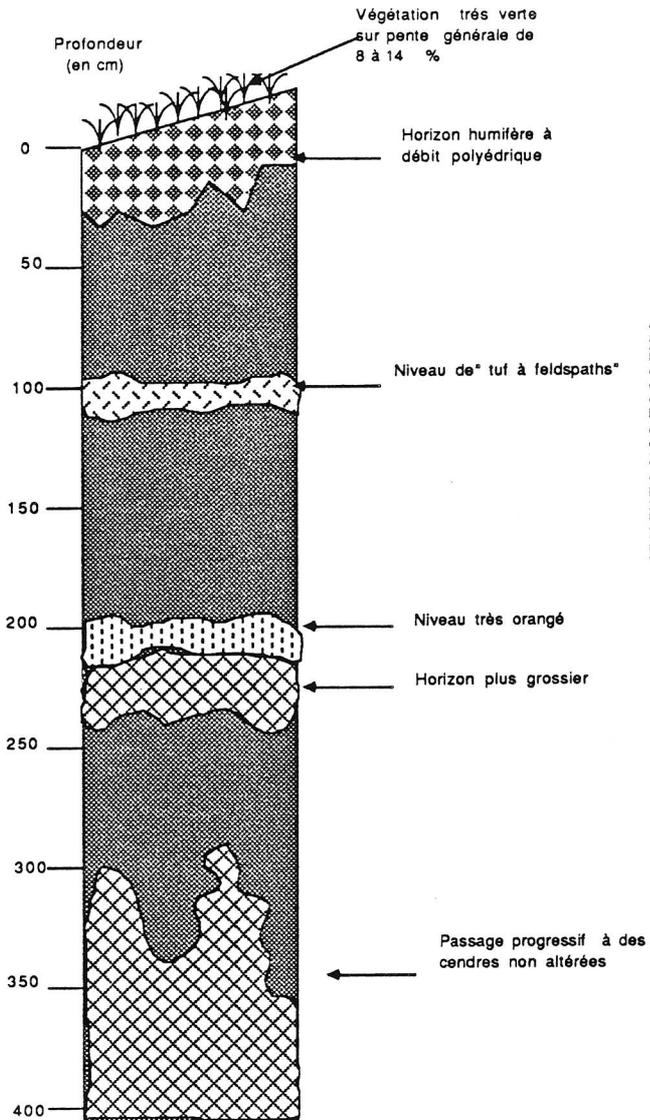


Fig.70: Lithologie du profil de Beaumont. Le profil se résume en une série d'andosols successivement rajeunis par les dépôts cendreux.

Teneur volumique en eau

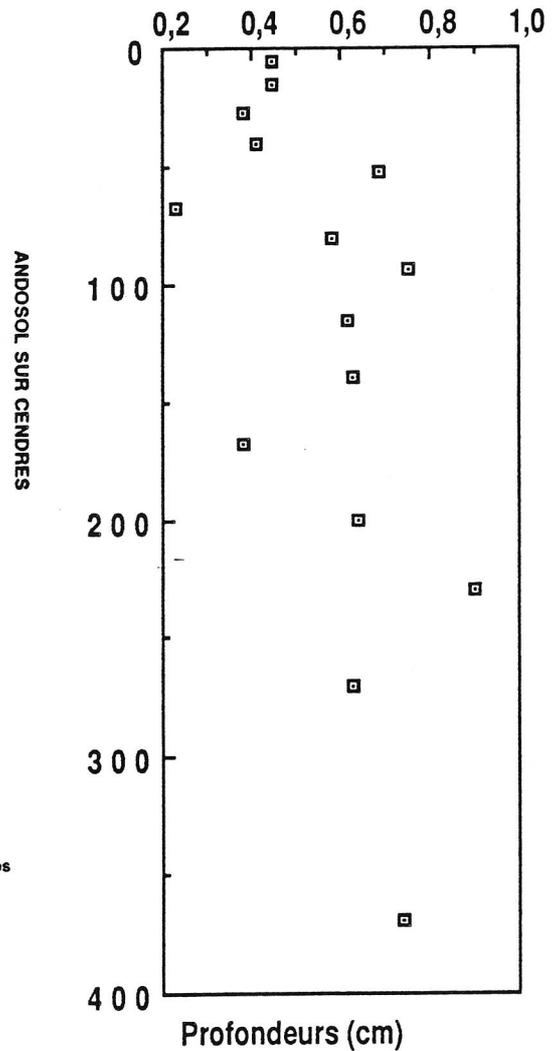


Fig.71: Profil des teneurs volumiques en eau du sol de Beaumont.

Le sol présente un niveau de surface moins humide que la profondeur où les teneurs sont proches de 0,65, soit dans le profil un stock de 2300mm d'eau.

IV.4.2.3.3 Modélisation de l'évaporation.

La modélisation n'est, bien sûr, possible que pour les premiers 81cm de sol où les teneurs décroissent.

Le calcul du rapport Z^v/Z^l (Eq.28) avec :

$P=90\%$	(porosité)	sans dimension,	
moy(W)=58%	(humidité volumique)	sans dimension,	
$D^l=2,3.10^{-9}$	(coefficient de diffusion (liquide))	$m^2.s^{-1}$	$L^2.T^{-1}$,
$D^v=0,2356.10^{-4}$	(coefficient de diffusion (gaz))	$m^2.s^{-1}$	$L^2.T^{-1}$,
$N_{sat}=0,023$	(Saturation en eau de l'air)	$kg.m^{-3}$	$M.L^{-3}$,

donne une valeur de **0,08** ce qui signifie un transfert dominant sous forme liquide.

L'application de la fonction de pondération (Eq.26) (transfert mixte , isotherme) donne une pente de calage telle que, le flux est égal à **70 mm.an⁻¹** (Eq.29,Annexe 17).

L'application de la fonction de pondération (Eq.27) (transfert liquide isotherme) donne une pente de calage telle que, le flux est égal à **51 mm.an⁻¹**(Eq.29,Annexe 18).

Pour les mêmes raisons que précédemment il semblerait que la valeur de **70 mm.an⁻¹** soit la plus plausible.

IV.4.2.3.4 L'infiltration.

Si l'on suppose que les valeurs les plus négatives du profil sont le fait de pluies exceptionnelles à caractère cyclonique, il convient de rechercher dans les chroniques météorologiques quand elles ont pu survenir. On relève, dans un contexte cyclonique les précipitations les plus importantes:

- le 5 février 1986, 251mm,
- le 19 février 85 , 361mm,
- le16 janvier 1985 , 541mm.

Entre le 5 février 1986 et la date du prélèvement, il a plu environ **1900 mm** pendant **248 jours** (période A) ,

entre le 19 février 1985 et le 5 février1986, **3460 mm** , pendant **351 jours** (période B),

entre le 16 janvier 1985 et le 19 février 1985, **1500 mm** , pendant **33 jours** (période C).

Si les "pics" de valeur négative sont associés à ces événements, on constate que:

- du pic à -3,7m au pic à -1,67 m le profil contient 1221mm représentatifs d'une hauteur de précipitations de 1500mm , soit une infiltration de **81 %**,
- du pic à -1,67m au pic de -0,8m le profil contient 608mm pour une hauteur de précipitée de 3460mm, soit une infiltration de **17,5 %**,
- du pic de -0,8m à la surface le profil contient 444mm d'eau pour une hauteur précipitée de 1900mm, soit une infiltration de **23,5 %**.

Les valeurs de précipitations sont très élevées par rapport aux hauteurs d'eaux stockées dans les

profils, surtout si l'on considère les bilans de surface sur parcelles qui montrent des valeurs de ruissellement négligeables malgré des valeurs de pentes entre 8 et 14%.

Une hypothèse pour expliquer ce phénomène est l'existence d'un ruissellement hypodermique favorisé par la pente et la stratification structurale du sol. Les "fuites" des profils peuvent être estimées si l'on considère qu'elles se produisent dans le premier mètre.

Par exemple, ruissellement et évaporation peuvent être estimés à :

- pendant la période A à $8,5\text{mm.j}^{-1}$,
- pendant la période B à $8,1\text{mm.j}^{-1}$,
- pendant la période C à $5,87\text{mm.j}^{-1}$.

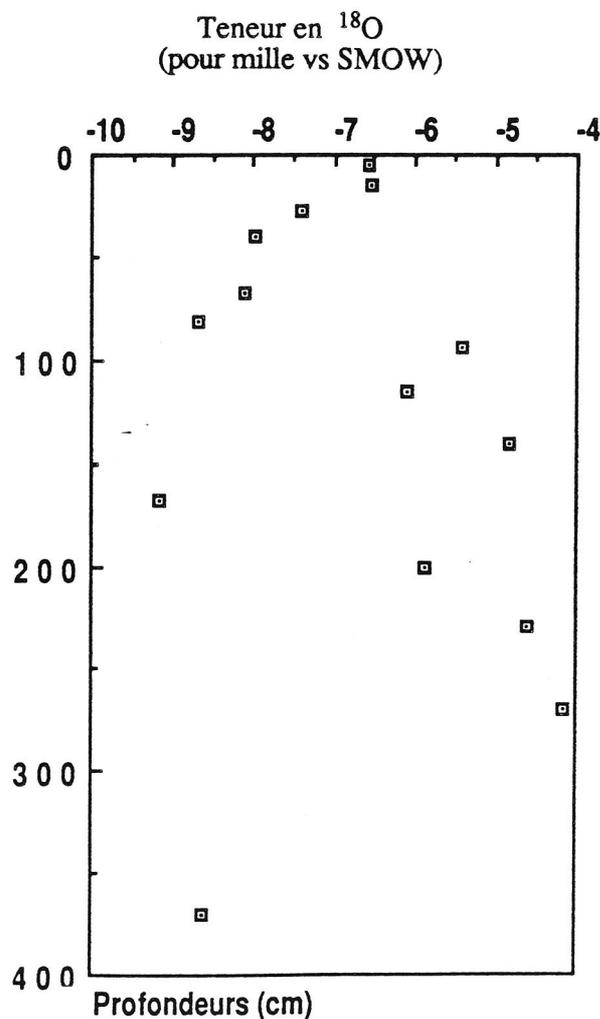


Fig.72: Profil des teneurs en ^{18}O (en ‰ vs SMOW) de l'eau du sol de Beaumont.

Le profil présente en surface une diminution des teneurs attribuée à l'effet de l'évaporation. En profondeur les pics négatifs sont à rattacher aux épisodes de pluies cycloniques violentes.

IV.4.2.4 Profil de La Montagne.

IV.4.2.4.1 Situation et pédologie.

La Montagne est située dans la partie nord ouest de l'île à 400m d'altitude (Annexe 19), la pluviosité moyenne annuelle est de **1581mm** et E.T.P. de **1361mm**. La géomorphologie est marquée, à l'endroit du profil, par les coulées basaltiques, enrobées d'une pellicule d'altération rarement supérieure à 1m, qui déterminent des interfluves bombés encadrés par de petits talwegs peu profonds mais bien marqués qui font apparaître le basalte. Le profil effectué sur un terrain à pente moyenne (10%), est celui d'un sol brun classique (Fig.73). Des fragments de basaltes sont rencontrés à la profondeur -1 m. Au moment du prélèvement le matériel est cohérent et résiste à la pénétration de la tarière dans la partie inférieure du profil.

IV.4.2.4.2 Profil des teneurs volumiques en eau (Fig.74).

Les teneurs volumiques évoluent de **0,27** en surface, jusqu'à **0,4** en profondeur. Il est difficile de dire si la saturation est atteinte en bas de profil, on estimera que la porosité est proche de **50%**. La teneur volumique moyenne en eau est de **0,34** soit une hauteur d'eau stockée de **343 mm**.

IV.4.2.4.3 Profil des teneurs en ^{18}O (Fig.75).

Les teneurs décroissent du haut ($-3,5\text{‰}$ vs SMOW) vers le bas, jusqu'à $-0,52\text{ m}$ ($-5,71\text{‰}$ vs SMOW), encore plus bas, les teneurs sont comprises entre $-5,15$ et $-4,34\text{‰}$ vs SMOW. La décroissance en surface est attribuable à l'effet de l'évaporation. Les teneurs en profondeur sont à relier avec les teneurs des précipitations de la saison des pluies 1985-1986 ($-4,45\text{‰}$ vs SMOW). La teneur minimum du profil pourrait être expliquée par le dernier épisode violent des précipitations en situation de perturbation cyclonique.

IV.4.2.4.4 Modélisation de l'évaporation.

La modélisation n'est possible que sur les valeurs superficielles, (jusqu'à $-0,52\text{m}$).

Le calcul du paramètres Z^v/Z^l (Eq.28) avec les valeurs:

$P=50\%$	porosité	sans dimension	
$\text{moy}(w)=34,7\%$	moyenne des teneurs volumique en eau	sans dimension,	
$D^l=2,3.10^{-9}$	coeff. de diffusion en phase liquide	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	L^2T^{-1} ,
$D^v=2,56.10^{-3}$	coeff. de diffusion en phase gazeuse	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	L^2T^{-1} ,
$N_{\text{sat}} = 2,3.10^{-2}$	saturation de l'air en eau	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$	$\text{M}.\text{L}^{-3}$,

donne $Z^v/Z^l=0,12$.

Le transfert liquide prédomine, sans être exclusif. L'application du modèle isotherme à transfert mixte (Eq.26, Annexe 20) donne un taux d'évaporation de **53 mm.an⁻¹**.

L'application du modèle isotherme à transfert liquide (Eq .27, Annexe 21) donne un taux

d'évaporation de 26 mm.an⁻¹.

IV.4.2.4.4 L'infiltration.

Le seul pic négatif "vrai" semble être celui situé à -0,52m . L'épisode le plus récent de fortes pluies relatives en situation de perturbation cyclonique est la pluie du 7 février 1986, où il est tombé 74 mm . Depuis cette pluie, la hauteur d'eau tombée jusqu'à la date de prélèvement est de 890 mm, en 253 jours. Or, la quantité d'eau stockée dans le profil est de 154mm, soit un déficit d'évaporation et de ruissellement de 732 mm, soit 2,89 mm.j⁻¹. Cette valeur correspond à une hauteur d'eau annuelle de 1056 mm ce qui est légèrement inférieur à ETP. L'infiltration calculée n'est que de 17% de la lame d'eau précipitée.

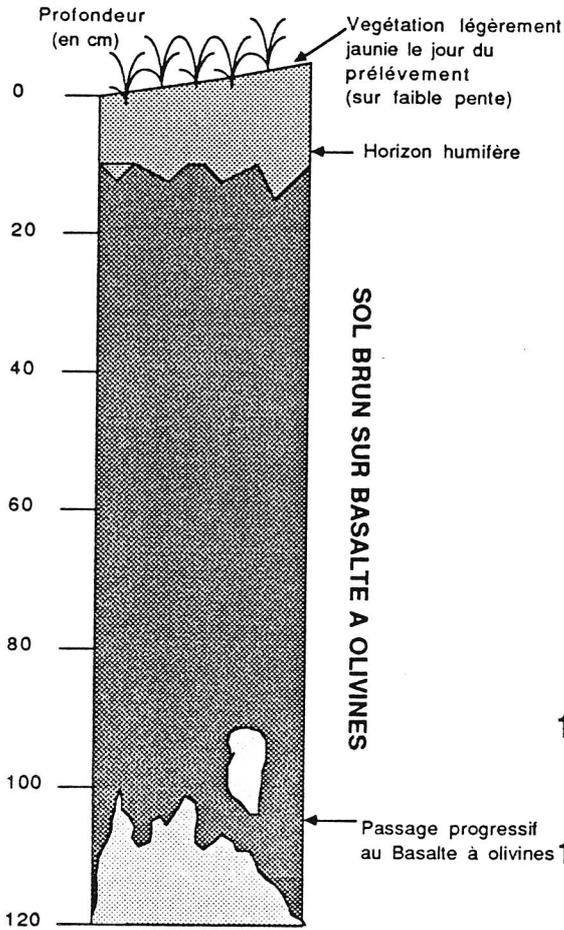


Fig.73: Lithologie du profil de La Montagne. Le profil se résume en un sol brun sur basalte.

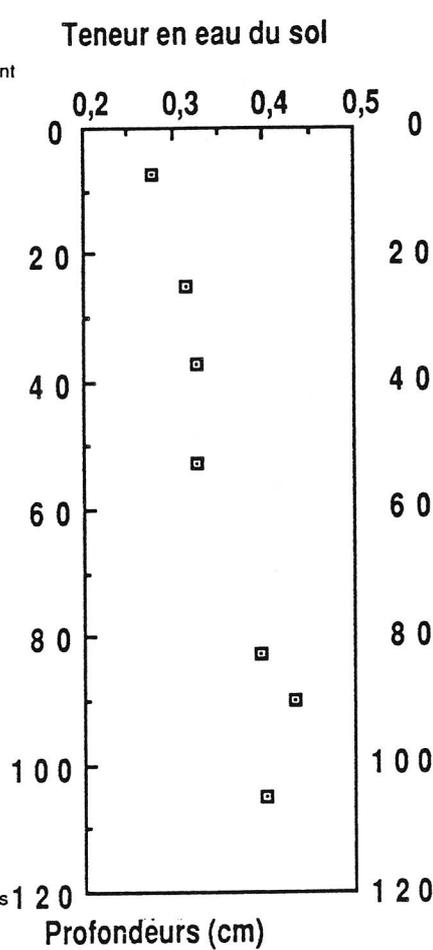


Fig.74: Profil des teneurs volumiques en eau du sol (La Montagne). Le sol présente un niveau de surface moins humide que la profondeur où les teneurs sont proches de 0,4 , soit dans le profil un stock de 350mm d'eau.

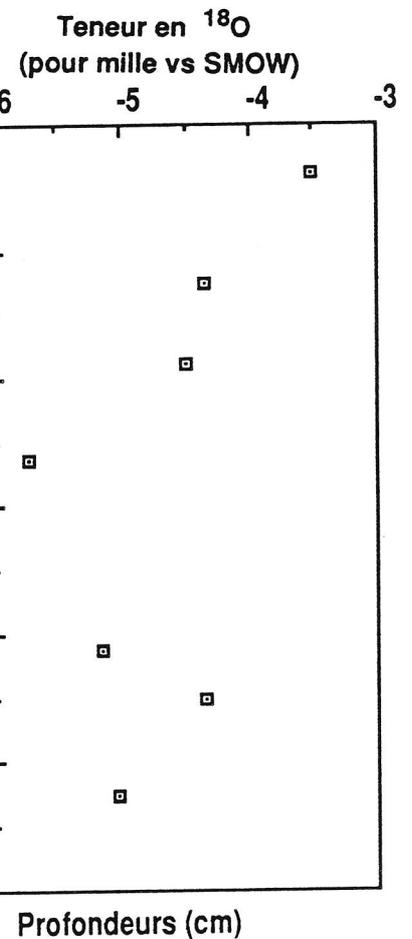


Fig.75: Profil des teneurs en 18O (en ‰ vs SMOW) de l'eau du sol de La Montagne. Le profil présente en surface une diminution des teneurs attribuée à l'effet de l'évaporation.

IV.4.2.5 Profil de Grand Etang.

IV.4.2.5.1 Situation et pédologie.

La situation du profil de Grand Etang (Annexe 22) est très particulière. Le site est situé à 516 m d'altitude sur le versant est de l'île. La zone est très arrosée et présente une moyenne annuelle des précipitations de 7362 mm pour une E.T.P. égale à 1041mm. Le profil a été réalisé, sur une zone inondable pendant la saison cyclonique, sur le bord d'un lac dont le niveau varie très largement pendant l'année. Le sol est défini comme un andosol désaturé perhydraté (Banton, 1984), mais comme il est inondé deux ou trois mois chaque année, l'apport annuel de sédiments lacustres de faible profondeur lui donne un cachet très particulier. Le niveau de l'étang est rencontré à 1,6 m de profondeur, le terrain étant plat (Fig.76).

IV.4.2.5.2 Profil des teneurs volumiques en eau.

Le profil (Fig.77) ne montre aucune tendance particulière, et les teneurs oscillent entre **0,44** et **0,28**. La rencontre du terrain saturé, à la base, coïncide avec un changement lithologique important, souligné par une teneur en eau inférieure par rapport au reste du profil.

IV.4.2.5.3 Profil des teneurs en ^{18}O .

Le profil (Fig.78) des teneurs (Annexe 23) ne montre pas de tendance très marquée puisque l'écart maximum entre deux mesures n'excède pas 2 ‰ vs SMOW. Dans ces conditions, bâtir un modèle d'évaporation serait très hasardeux. De même, la reconnaissance de "pics négatifs", reflets de pluies de type cyclonique est illusoire. La méthode montre donc ici ses limites, **aucun effet d'évaporation ou d'infiltration** ne pouvant être établi.

IV.4.2.6 Le problème des profils de concentration en chlorures.

Si nous avons choisi de séparer l'interprétation des profils (Fig.79,80,81,81) (Annexe 24) des teneurs en chlorures de celle des profils de teneurs en ^{18}O , c'est que leur étude est décevante. Il semble pourtant au regard des profils que les ions chlorures obéissent à une loi de concentration en haut de profil. Les teneurs sont faibles, toujours inférieures au meq.l^{-1} mais le profil prend une allure plus ou moins exponentielle pour rejoindre vers le bas la teneur observée dans les pluies (Cf. §III). Le problème est que cette concentration vers le haut est toujours observée quel que soit le résultat du bilan hydrique. Par exemple, à Grand Etang les valeurs de base du profil (qui sont proches de celles des pluies sont multipliées par 4 vers la surface alors que le bilan hydrique de surface est largement excédentaire même pendant la saison sèche. La raison de cet enrichissement

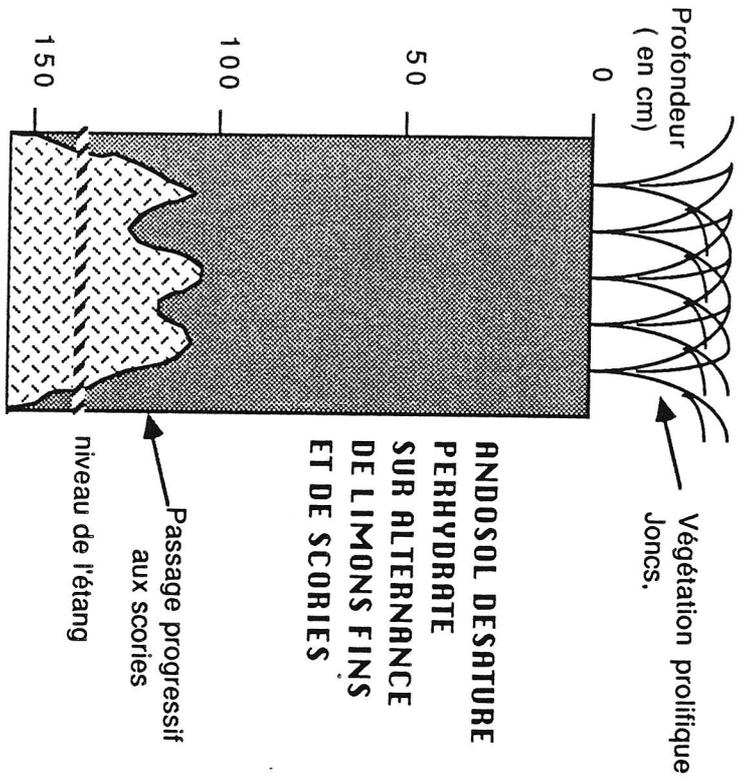


Fig.76: Lithologie du profil de Grand Etang Le
profil se décrit comme un andosol désaturé perhydraté en
zone inondable.

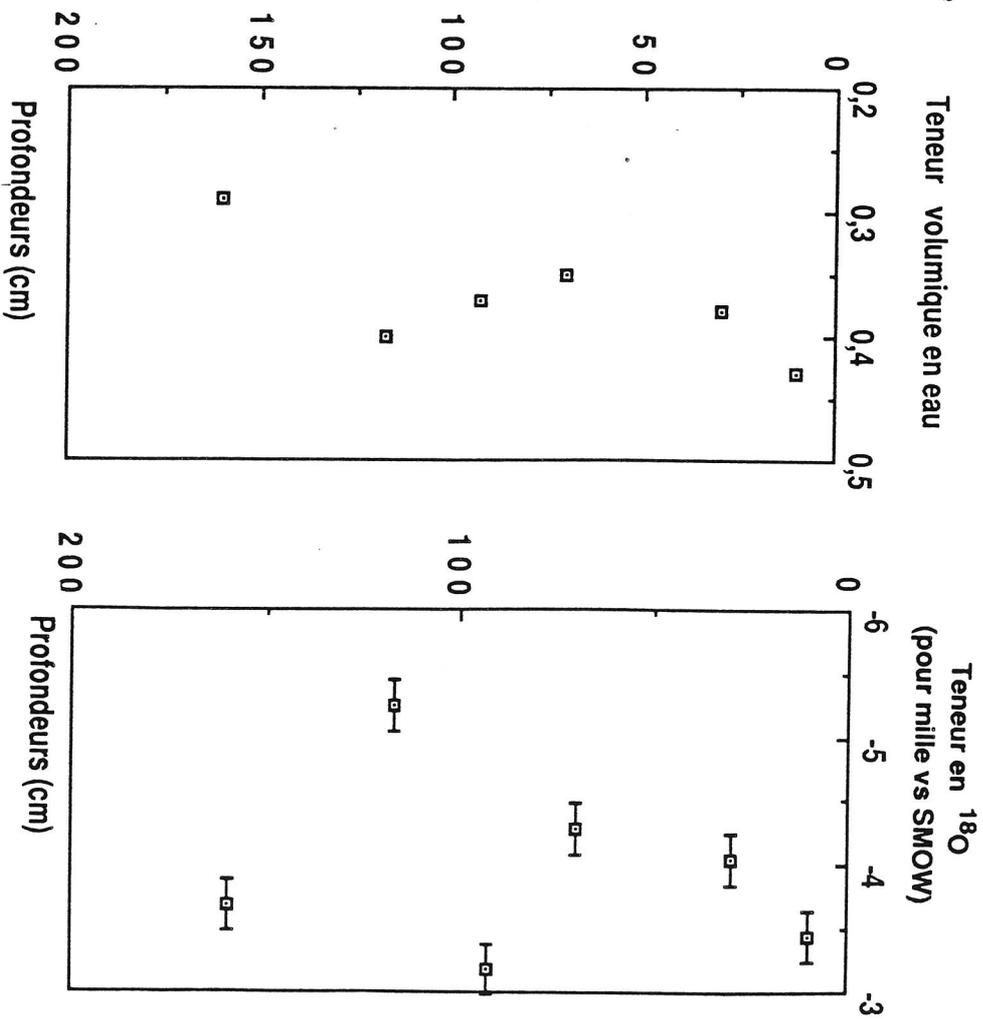


Fig.77: Profil des teneurs volumiques en eau
du sol de Grand Etang. Les teneurs volumiques ne
diminuent pas en surface.

Fig.78: Profil des teneurs en ¹⁸O (en ‰ vs
SMOW) de l'eau du sol de Grand Etang. Le
profil ne présente pas surface, de diminution des
teneurs attribuable à l'effet de l'évaporation.

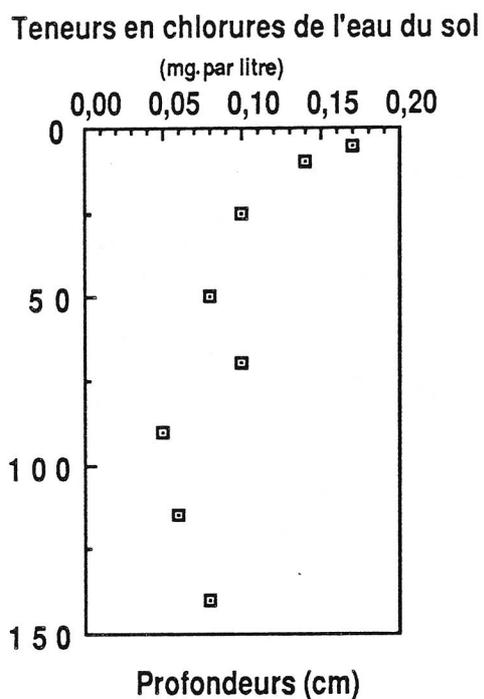


Fig.79: Profil des teneurs en Cl^- ($meq.l^{-1}$) de l'eau du sol de Grand Etang.

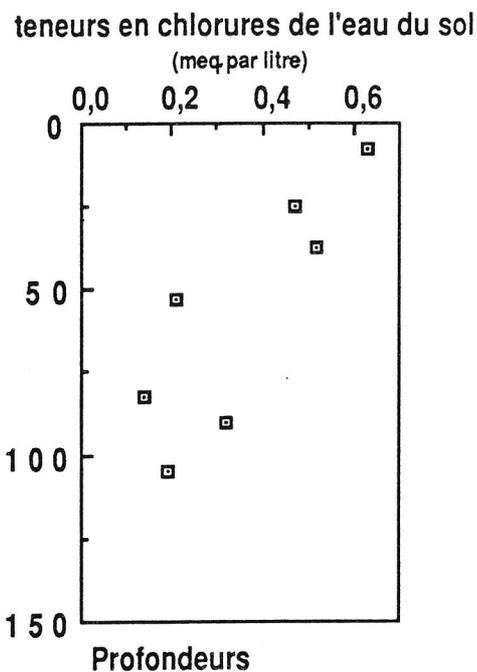


Fig.82: Profil des teneurs en Cl^- ($meq.l^{-1}$) de l'eau du sol de La Montagne.

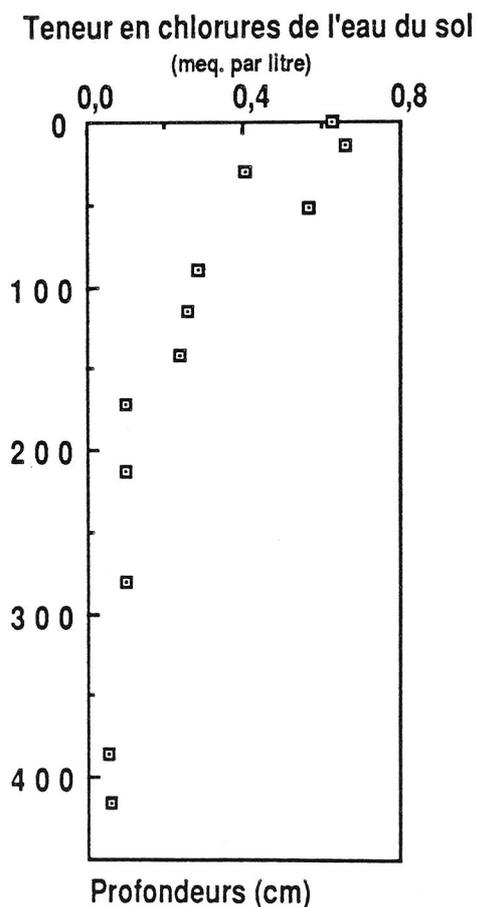


Fig.81: Profil des teneurs en Cl^- ($meq.l^{-1}$) de l'eau du sol de Beaumont.

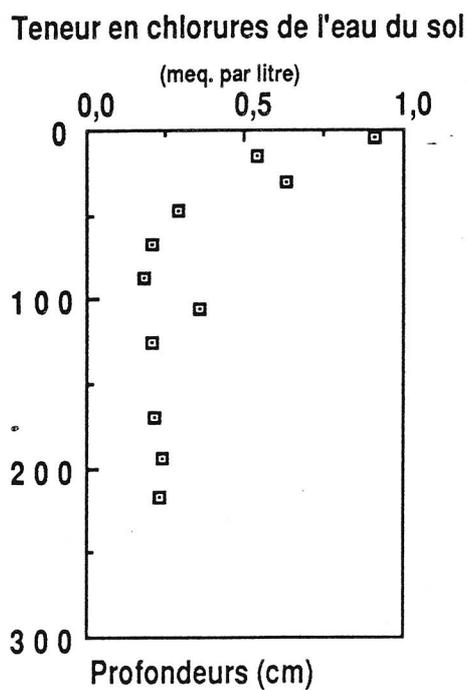


Fig.80: Profil des teneurs en Cl^- ($meq.l^{-1}$) de l'eau du sol de Trois Bassins.

vers le haut des profils semble donc extérieure aux conditions climatiques, il pourrait s'agir de l'influence du fort taux de matière organique que l'on rencontre dans les profils humides et qui peut atteindre 20% (Rosello, 1984), taux qui diminue avec la profondeur.

La matière organique pourrait interférer de deux manières.

a) La mesure à pu être faussée par influence sur l'électrode d'argent (Cf. §II.2.2.1), ceci malgré le l'addition d'acide nitrique, préconisé par la méthode (Rodier, 1984).

Remarque: Cette hypothèse est d'autant plus plausible, que la méthode atteint certainement sa limite, avec des concentrations mesurées souvent inférieures au mg.l^{-1} .

b) Par "rétention" des ions chlorures par la matière organique, il est possible que les concentrations mesurées soient supérieures à celle des solutions. Le soupçon qui pèse sur la mesure est renforcé par le fait, que les teneurs en matière organique sont plus fortes avec l'altitude (Fig.83) (Rosello, 1984).

Remarque: L'on pourrait aussi évoquer d'hypothétiques capacités d'échanges des "gels" de silice.

Or les concentrations en chlorures semblent moindres dans les profils de la Montagne (400m) et de Grand Etang (516m) qui sont situés à des altitudes plus faibles que les autres. C'est pourquoi il a été choisi de ne pas discuter et interpréter ces profils en termes d'évaporation et de ruissellement.

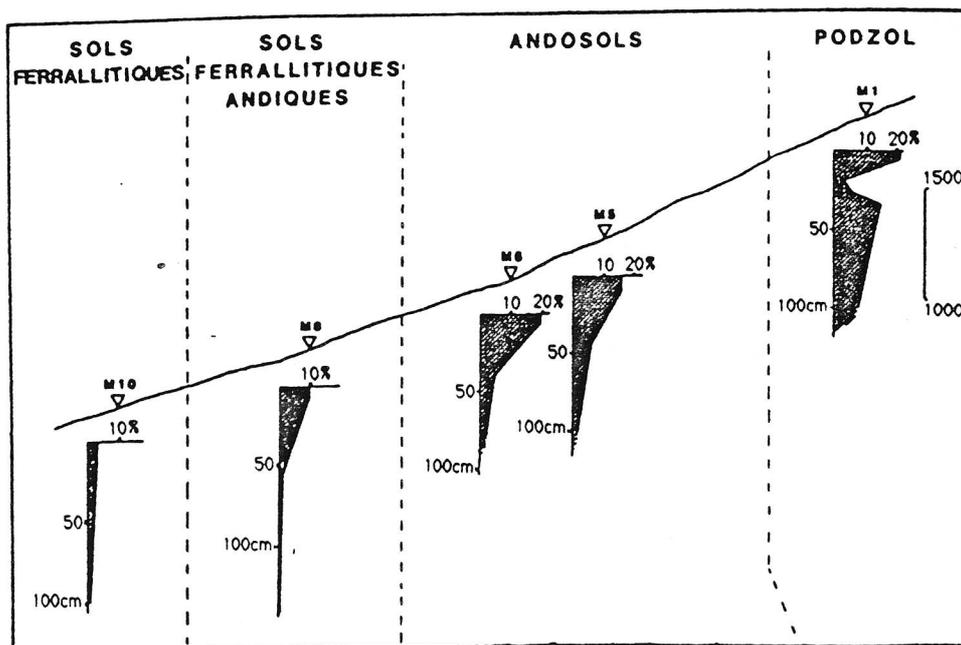


Fig.83: Teneurs en matière organique de quelques sols d'après Rosello (1984).

Ces teneurs sont à rapprocher des figures précédentes. Il s'est certainement produit une interaction entre matière organique et teneur en ions chlorures, soit au niveau de l'analyse, (influence de la matière organique sur l'électrode d'argent), soit au niveau du sol par absorption.

IV. 5 SYNTHESES DES RESULTATS.

IV.5.1 Profils en situation d'évaporation de nappe.

Sur la côte aride de l'île, l'évaporation dépend essentiellement de la profondeur de la nappe. L'analyse des teneurs isotopiques de l'eau des profils effectués en fin de saison sèche fait apparaître une évaporation probablement irréductible de:

7,3mm.an⁻¹ pour le profil de S^t Paul,

32,5mm.an⁻¹ pour le profil de S^t Gilles,

70mm.an⁻¹ pour le profil d'Etang Salé.

Ces résultats permettent de montrer l'influence de la profondeur de la nappe sur le taux d'évaporation. Compilés avec ceux obtenus au Sahara par Colin-Kazcala (1986), ils illustrent aussi le **changement probable de mode de transfert** qui, pour une "épaisseur" de "sol" sableux supérieure à **2m** semble privilégier le transport **en phase vapeur** (Fig.84).

Remarque: Les profondeurs de nappes libres ne sont évidemment pas des constantes dans le temps, néanmoins, l'on admet dans ce travail que les fluctuations piézométriques, sont lentes vis-à-vis du temps d'installation du régime permanent. Cette hypothèse de travail est renforcée par le fait que les profils sont prélevés à la fin de la saison sèche.

Les résultats obtenus par le bilan des chlorures permettent d'affiner la connaissance du processus. En effet, le calage sur un modèle exponentiel de décroissance de l'évaporation permet d'estimer les valeurs d'évaporation de :

32,8 mm.an⁻¹ à St Gilles(avec $K=0,0178$),

103,7 mm.an⁻¹ à Etang salé(avec $K=0,0137$),

36,4 mm .an⁻¹ à St Paul (avec $K=0,0231$),

La concordance entre, les ordres de grandeur de l'évaporation calculés par le bilan isotopique au moment de l'échantillonnage, et les ordres de grandeur trouvés avec le bilan en ions chlorures pour les profils de S^t Gilles et Etang Salé tend à montrer que l'hypothèse logarithmique est recevable. Les décroissances logarithmiques sont d'autant plus **rapides** que la nappe est **profonde**.

IV.5.2 Profils en situation " d'excédent hydrique".

L'étude menée sur les profils des "Hauts" fournit des éléments d'appréciation sur les capacités des andosols à se "**fermer**" à l'évaporation. Leurs fortes teneurs en eaux ne signifient aucunement qu'ils sont propices à l'évaporation, car cette eau est fortement liée au matériel conformément aux relations établies par Vaksman (1987). Ainsi, pour des sols contenant plus de 20% d'eau en surface, l'évaporation calculée n'est que de :

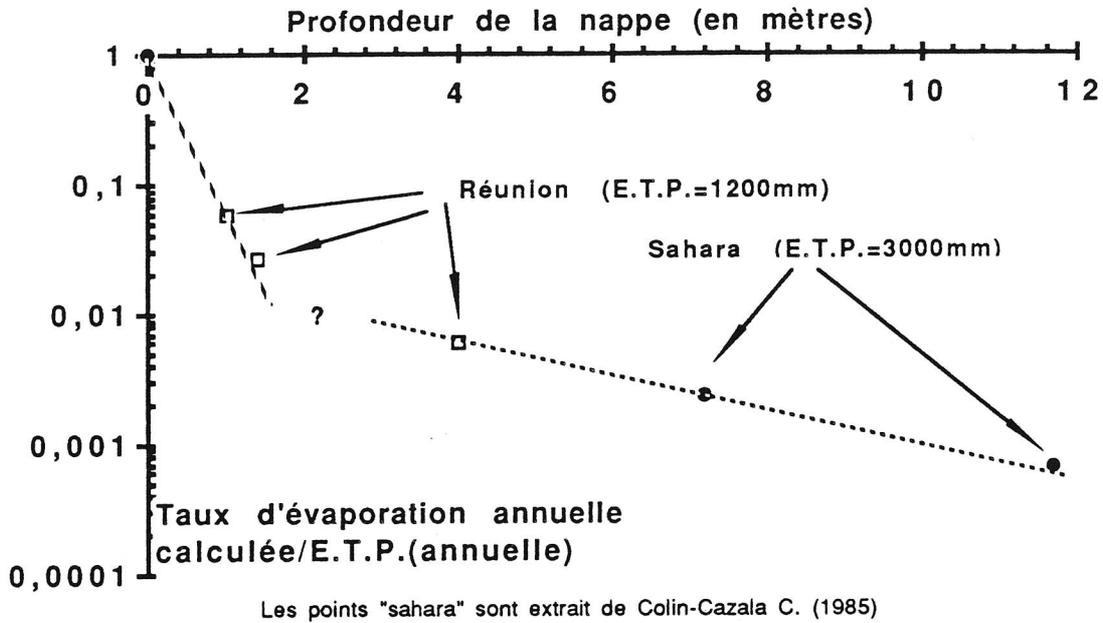


Fig.84 a: Illustration de l'effet de la profondeur de la nappe sur le taux d'évaporation à flux constant (réduit par l'ETP).

Aux valeurs calculées pour la Réunion sont adjointes les valeurs de Colin Kazcala (1985) calculées pour des profils du Sahara Nord Occidental. La figure illustre le changement d'évolution du taux d'évaporation à partir d'une profondeur de nappe de 2m.

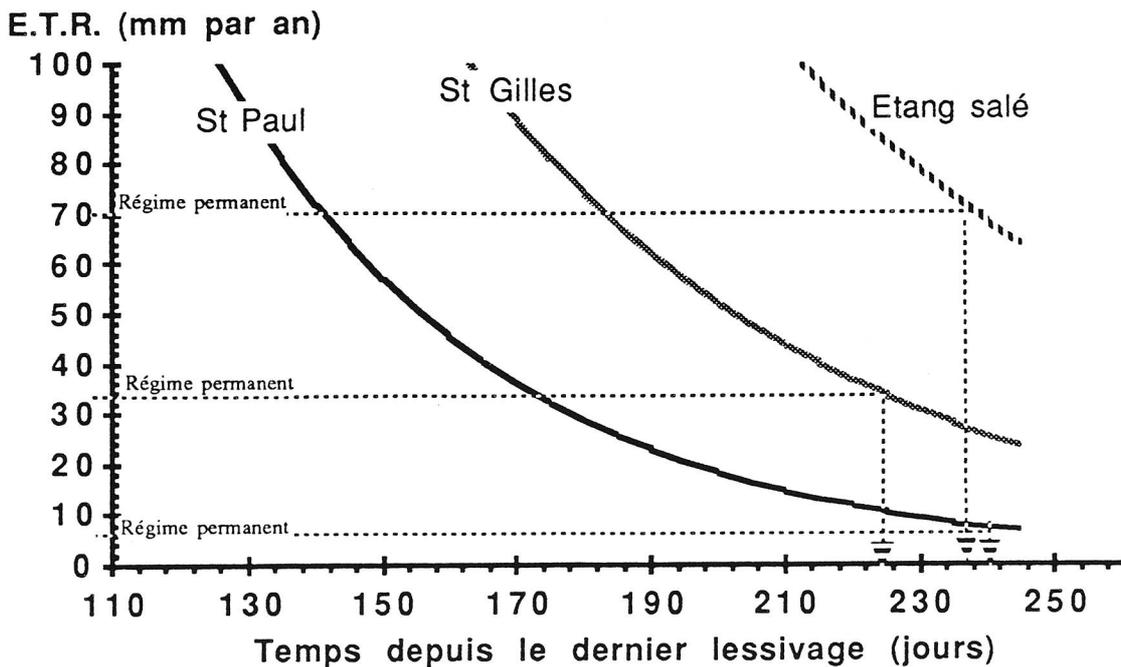


Fig.84b: Comparaison entre la décroissance de l'évaporation donnée par le bilan en ions chlorures et le régime permanent (bilan isotopique). Pour des valeurs d'évaporations égales au "régime permanent" les temps depuis le dernier lessivage sont compris entre 220 et 240 jours ce qui est compatible avec le lessivage saisonnier.

53 mm.an⁻¹ pour La Montagne,
 45 mm.an⁻¹ pour Trois Bassins,
 70 mm.an⁻¹ pour Beaumont.

L'étude fournit aussi une appréciation des quantités réellement infiltrées relatives aux pluies (en %) et absolues en mm.j⁻¹ .

Profil	1986		1985		fév.85	
Trois Bassins	51%	1,9 mm.j ⁻¹	66%	1,9 mm.j ⁻¹	--	--
Beaumont	23%	1,8 mm.j ⁻¹	17%	1,7 mm.j ⁻¹	81%	37 mm.j ⁻¹
La Montagne	17%	0,6 mm.j ⁻¹	--	--	--	--

La différence entre ces estimations et celles déduites des observations des parcelles (89% d'infiltration) réside probablement dans la non-prise en compte du ruissellement hypodermique dans le premier mètre de sol qui assure pendant la décrue l'essentiel des débits des ravines. Ce ruissellement est favorisé par la stratification structurale des andosols sur cendres causée par les "rajeunissements" successifs. D'ailleurs, ces taux d'infiltration sont cohérents avec les bilans de bassins où l'infiltration est estimée entre 63% et 12% (Atlas hydrogéologique de la Réunion, 1986). Enfin, vu l'épaisseur des recouvrements cendreux dans les hauts (plus de 10m par endroit) et leurs fortes teneurs en eau (plus de 50%), il est important de noter que l'eau qui s'infiltré dans les laves qui sont le substratum de ces dépôts est, si l'hypothèse de l'effet piston est retenue, vieille de quelques années du fait de l'inertie que représente la lame d'eau stockée dans ces terrains superficiels. Par exemple, pour une infiltration de 2mm.j⁻¹, à travers 10m de terrain à 50% en eau le "trajet" est d'environ 2500jours soit 6,8 ans. Les andosols, sans constituer, un véritable aquifère car la proportion d'eau "gravitaire" y est trop faible jouent certainement un rôle régulateur important dans l'alimentation des "aquifères" sous-jacents.

CHAPITRE CINQUIEME
ETUDE HYDROCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

RAPPEL DU SOMMAIRE CHAP.V: ETUDE HYDROCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES	p.121
V.1 Etude de l'hydrochimie des eaux éloignées de l'océan	p.122
V.1.1 Description du résultats des analyses	p.122
V.1.2 Etude de la mise en solution du carbone	p.125
V.1.2.1 Application	p.126
V.1.3 L'hydrolyse des minéraux silicatés	p.130
V.1.3.1 Généralités	p.130
V.1.3.2 Les diagrammes de stabilité	p.131
V.1.3.2.1 Principes	p.131
V.1.3.2.2 Application	p.132
V.1.3.3 Recherche des pôles de minéralisation	p.132
V.1.3.3.1 Pôles géochimiques et minéralogiques	p.134
V.1.3.3.2 Critères de reconnaissance géologique des points d'eau	p.136
V.1.3.3.3 Représentation de Piper	p.136
V.1.3.3.3.1 Echantillons de la saison sèche 1986	p.136
V.1.3.3.3.2 Echantillons de la saison humide 1985-1986.	p.136
V.1.3.3.4 Détermination des minéraux en cours d'hydrolyse	p.138
V.1.3.3.4.1 Méthode employée	p.138
V.1.3.3.4.2 Application aux minéraux magnésiens	p.138
V.1.3.3.4.3 Application aux minéraux sodiques	p.140
V.1.3.3.4.4 Application aux minéraux calciques et potassiques	p.140

V.1.3.3.5 Approche statistique	p.143
V.1.4 Conclusion sur la chimie des eaux éloignées de l'Océan.	p.144
V.2 Etude hydrochimique des points d'eau à proximité de l'Océan	p.145
V.2.1 Généralités	p.145
V.2.2 Correction de l'influence marine	p.148

INTRODUCTION.

Les points d'eau prélevés sont essentiellement des sources, des piézomètres, des puits et des forages (exploités ou non). La description des points d'eau visités lors des trois campagnes de terrains font l'objet de l'annexe 25, l'on y trouvera en fonction des noms de code, l'altitude, la nature, le code B.S.S. (quand cel est possible), le nom local et la description succincte de la situation.

Pour les sources, il est souvent difficile (Cf.§IV) de distinguer les **eaux souterraines** des eaux dites "**superficielles**" tout simplement parce que l'eau peut s'infiltrer, puis donner naissance à une source, ruisseller et s'infiltrer à nouveau.

Remarque: Dans le cas de certaines ravines suivies par des coulées, l'eau jaillit au contact "paléosol-coulée", s'écoule sur une courte distance, avant de se perdre à la faveur des fissures de la coulée inférieure, mises à nues par l'érosion. Dans ces circonstances, il est impossible de départager ce qui relève du ruissellement, ce qui relève de l'écoulement souterrain.

La première campagne de prélèvement (avril 1986) a eu lieu pendant la saison humide, il est probable que l'échantillonnage comprend parfois des eaux superficielles. Certains points d'eau se sont avérés n'être que des écoulements d'origine superficielle, puisqu'ils étaient secs lors de la campagne de saison sèche (quelques points d'eau du rempart de Cilaos). Même si un écoulement persiste pendant la saison sèche, le caractère "non superficiel" des eaux n'est pas une certitude puisque, sur le versant est, une certaine pluviosité persiste.

L'hydrochimie des eaux souterraines est la conséquence, de l'apport d'éléments par les pluies (cf .§III.1), de l'interaction avec la matrice organique et minérale des sols et des roches et enfin, en bord de mer, de la contamination par les éléments marins.

Dans un premier temps, on étudiera l'interaction eau-roche à l'aide des analyses effectuées sur des points d'eau suffisamment éloignés de l'océan pour que l'influence marine puisse être négligée. Ce sont essentiellement les sources des pentes externes et des remparts.

Dans un deuxième temps, on étudiera l'influence marine sur l'hydrochimie des eaux côtières en se basant sur les analyses des prélèvements dans les ouvrages et quelques sources.

V.1 ETUDE DE L'HYDROCHIMIE DES EAUX ELOIGNEES DE L'OCEAN.

V.1.1 Description des résultats des analyses.

Les résultats d'analyses sont données en millimol.l⁻¹, en meq.l⁻¹, en mg.l⁻¹ dans les tableaux 8,9 et dans les annexes 26,27,28 & 29.

Les principales caractéristiques statistiques sont les suivantes :

Variables	Cond. μs.cm ⁻¹	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	HCO ₃ ⁻
		----- millimol.l ⁻¹ -----					
Saison sèche							
moyennes	159	0,43	0,04	0,30	0,20	0,46	1,28
écarts-types	83	0,39	0,02	0,16	0,13	0,17	0,61
coeff. variations	0,52	0,91	0,68	0,55	0,66	0,38	0,47
Saison humide							
moyennes	128	0,69	0,03	0,29	0,12	0,42	1,31
écarts-types	62	0,32	0,03	0,19	0,10	0,25	0,68
coeff. variations	0,48	0,47	1,13	0,64	0,85	0,60	0,52

Il apparaît au regard de ces résultats que les eaux du Piton des Neiges sont des eaux **peu minéralisées** en moyenne. Mais les teneurs sont encore **20 à 30 fois plus fortes que dans les pluies** (Cf. §III.1.2.1). Le carbone dissous joue un rôle essentiel dans la minéralisation et sa teneur est relativement constante d'une saison à l'autre. En unité molaire, les teneurs sont par ordre d'importance, pour la saison sèche, HCO₃⁻, SiO₂, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, pour la saison humide HCO₃⁻, Na⁺, SiO₂, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺. Les teneurs en SiO₂, HCO₃⁻, Ca²⁺, K⁺ sont relativement constantes d'une saison sur l'autre, alors qu'en saison humide, les teneurs en Na⁺ semblent augmenter et les teneurs en Mg²⁺ diminuer. Les coefficients de variations sont compris entre 0,3 et 0,9 pendant la saison sèche augmentent pendant la saison humide sauf pour Na⁺.

Les conductivités électriques baissent légèrement pendant la saison cyclonique ce qui semble indiquer que les eaux sont légèrement moins minéralisées, néanmoins le coefficient de variation reste le même ce qui indique que la distribution des minéralisations globales est probablement la même.

nom	Conductivités	Temp	pH	+				-				Total				
	microsiemens par cm	(°C)		Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO3	SO4	NO3		PO4	SiO2		
												milligrammes par litre.....	milligrammes par litre.....	
MACIL	211	21,6	9,40	8,0	1,64	26,0	4,0	6,5	88,5	6,7	0,0	0,0	31,2	172,6		
CIL1	68	12,1	7,66	3,5	2,51	6,7	3,4	0,6	42,7	1,2	0,0	0,0	27,0	87,6		
CIL39	296	16,4	7,93	21,0	1,94	24,7	2,8	0,0	146,4	8,1	0,0	0,4	20,2	225,5		
CIL45	297	15,5	7,99	38,5	2,63	12,7	1,4	3,6	146,4	3,3	0,0	5,8	24,2	238,6		
CILB	317	16,4	7,85	21,0	1,56	22,5	5,0	0,0	149,5	7,7	0,0	0,0	19,4	226,6		
CILD	236	17,3	7,16	28,5	1,26	17,8	4,6	0,4	112,9	2,4	0,0	0,0	27,4	195,2		
CILE	210	11,8	7,83	12,0	1,64	14,4	3,6	0,0	100,7	2,5	0,0	0,0	20,4	155,3		
CILF	320	12,8	8,35	26,0	2,74	34,0	5,6	0,0	164,7	2,5	0,0	0,0	29,6	265,1		
CILG	238	16,0	8,61	9,3	0,76	20,5	4,8	1,8	112,9	4,8	0,0	0,0	18,8	173,7		
CIL?	250	16,4	7,58	10,3	0,69	21,8	7,6	0,0	131,2	1,4	0,0	0,0	36,0	209,0		
CILK	306	12,3	7,80	50,0	1,37	10,6	1,5	3,8	109,8	28,0	0,0	0,0	24,6	229,6		
AUCAP	140	17,0	6,84	7,6	1,94	9,2	2,6	0,4	64,1	0,5	0,0	0,0	32,6	119,0		
ORCAS	119	17,6	6,76	6,7	2,74	6,4	4,3	7,4	58,0	1,3	4,6	0,4	44,1	136,0		
ORSOU	119	19,0	7,10	8,8	2,82	5,9	2,1	13,7	30,5	0,0	0,0	1,1	31,0	95,9		
ORCAP	84	17,0	7,29	5,6	1,94	4,6	5,0	5,3	48,8	1,4	1,6	0,9	44,1	119,2		
ORNB	101	18,4	7,56	6,5	1,37	5,6	5,5	7,1	61,0	0,0	0,0	0,3	52,0	139,4		
RIVMAT	157	20,9	7,76	11,2	1,45	15,4	4,3	3,5	97,6	6,0	0,8	0,4	25,0	165,6		
SAL35	171	16,8	7,79	8,8	0,88	18,5	2,7	6,2	79,3	0,9	0,6	0,9	32,8	151,5		
SAL4	210	17,5	7,84	11,6	4,38	17,0	10,0	4,3	97,6	3,5	2,5	1,7	36,8	189,4		
SAL43	84	14,7	7,38	5,1	2,06	5,6	1,2	1,3	36,6	0,5	0,8	2,4	23,2	78,8		
SALB	144	18,0	7,52	10,0	1,18	12,5	2,2	1,9	94,6	0,5	0,8	0,6	20,8	145,0		
SALC	76	20,0	7,24	5,6	1,87	6,7	2,4	1,3	39,7	0,4	2,4	1,1	21,2	82,8		
SALD	156	20,3	7,52	8,8	1,45	12,0	3,1	2,5	73,2	2,8	0,0	0,4	19,6	123,9		
SALE	290	19,3	8,17	18,5	3,12	17,0	14,0	1,7	137,3	19,0	0,9	0,6	21,6	233,8		
SALS1	227	13,0	7,86	10,0	0,88	22,0	2,9	1,4	109,8	7,3	3,5	0,3	20,2	178,2		
SAL2	276	21,0	7,52	8,9	2,25	19,3	11,4	4,3	128,1	7,4	4,9	1,1	42,3	229,9		
SAL26	118	15,3	7,40	14,7	0,88	10,3	1,6	1,6	61,0	0,8	1,0	1,3	21,2	114,3		
GR ET	27	24,1	5,96	2,0	0,30	3,0	1,8	7,1	0,3	0,0	3,1	0,6	1,0	19,2		
RIVRO	94	20,9	7,48	5,3	0,69	13,7	3,1	10,6	39,7	1,8	2,3	0,3	14,0	91,5		
MILLBB	87	18,2	7,50	4,8	0,30	6,0	5,6	10,6	42,7	1,0	0,0	0,1	16,0	87,1		
MILBR	106	18,5	7,46	5,7	0,50	6,4	5,2	7,1	51,9	0,0	1,2	0,7	20,0	98,7		
MILF	92	18,3	7,42	4,2	0,38	6,0	5,8	7,1	48,8	0,9	1,2	0,1	16,0	90,5		
DD24	127	15,0	6,48	4,0	0,38	13,8	5,3	5,0	58,0	8,0	0,0	0,1	24,0	118,6		
POCE	226	18,6	6,80	8,0	0,99	10,2	12,3	7,1	94,6	1,4	0,0	0,6	49,8	185,0		
PO22	225	18,5	6,96	8,4	1,18	10,4	8,6	10,7	94,6	1,7	0,0	1,6	51,8	189,0		
PO23	202	19,0	6,77	6,8	1,18	10,9	7,9	3,8	85,4	1,2	0,0	0,4	37,4	155,0		
PO35	257	22,2	6,58	8,0	1,26	12,7	12,5	3,6	115,9	0,8	0,0	0,1	38,6	193,5		
PO68	230	23,0	7,10	8,7	1,75	12,0	10,4	10,7	100,7	1,8	0,0	0,4	49,8	196,3		
POMAD	180	18,2	6,90	6,2	2,63	8,2	6,5	8,9	67,1	1,3	0,0	1,3	33,8	136,0		
TEV34	95	12,6	7,38	4,8	0,50	7,2	4,3	26,6	54,9	0,5	0,0	0,1	20,0	118,9		
TEV38A	112	14,5	6,64	6,7	3,12	7,2	3,9	6,9	58,0	0,8	1,0	0,0	23,0	110,6		
TEV38B	70	14,7	6,89	4,1	0,38	7,9	3,9	10,6	36,6	0,0	1,9	0,3	25,0	90,7		
TEV38C	75	14,5	6,60	4,0	0,50	8,2	2,4	6,1	36,6	0,0	0,5	0,0	25,0	83,3		
TEV43D	97	14,9	6,84	4,7	0,38	6,8	4,7	7,4	51,9	0,0	0,0	0,0	25,0	100,9		
TEV43G	100	14,9	6,80	5,2	0,38	6,9	3,9	7,2	54,9	0,0	0,0	0,0	24,0	102,5		
TEV44	92	15,5	7,72	4,5	0,38	8,3	2,6	0,0	54,9	1,0	0,0	0,0	23,1	94,8		
TEV46A	82	14,0	7,58	4,5	0,30	8,3	2,1	0,0	53,7	0,0	0,0	0,0	24,4	93,3		
TEV46B	89	13,1	7,25	4,5	0,30	6,0	2,0	0,0	58,6	0,0	0,0	0,0	23,3	94,8		
TEV46C	128	15,5	6,93	4,2	0,38	7,6	1,9	0,0	85,4	0,0	0,0	0,0	26,3	125,8		
TEV63	103	14,5	6,31	5,5	1,94	7,2	2,6	7,0	48,8	0,0	0,0	0,0	25,0	98,0		

Tab.8: Résultats des analyses des eaux éloignées de l'océan pendant la saison sèche 1986 (milligrammes par litre).

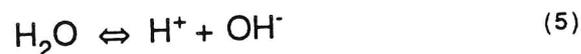
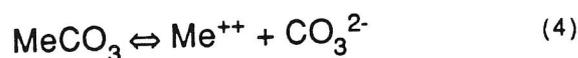
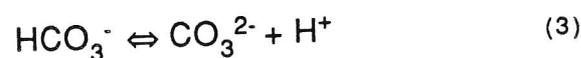
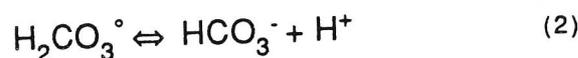
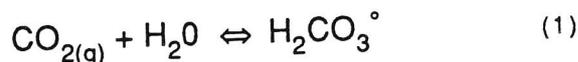
	Temp (°C)	pH	Cond. micro siemens par cm	+	+	2+	2+	-	-	-	total
.....milligrammes par litre.....											
CIL45	17,7	8,01	200	15,7	0,50	21,0	5,6	2,8	123,8	9,6	179,1
CILB	15,4	7,50	170	34,5	1,56	9,5	6,5	2,5	106,1	23,7	184,4
CILH	16,8	7,77	190	14,8	0,53	19,7	4,5	2,5	127,5	25,4	195,0
CIL?	18,1	7,80	240	39,6	0,30	13,5	0,9	5,7	156,2	23,1	239,2
MACIL	22,4	6,57	215	15,0	1,30	19,3	5,0	25,5	86,0	21,9	174,0
CILG	18,6	7,90	235	28,0	1,56	34,0	4,9	2,8	165,9	16,0	253,2
CILDTH	16,0	7,87	235	17,9	0,91	20,8	0,9	2,8	160,4	15,2	219,0
CIL1	15,1	6,70	50	8,3	1,79	4,9	0,5	2,8	32,0	18,6	69,0
CIL38	19,6	7,50	230	24,0	0,50	4,9	2,6	5,3	141,5	36,3	215,1
CIL40	17,9	8,05	185	17,2	0,72	17,0	3,4	2,5	123,8	36,3	200,9
CILE	18,4	7,90	170	19,5	0,38	20,0	2,9	2,1	111,6	18,1	174,6
CIL RL	16,1	8,40	220	23,0	2,21	19,6	2,6	2,3	153,1	22,2	224,9
CILD	17,3	7,76	140	16,7	0,53	14,6	2,4	1,3	98,2	19,4	153,1
CILD	16,0	7,30	130	27,7	0,38	7,4	0,9	2,3	104,9	19,5	163,1
CIL CG	16,2	7,20	215	15,7	0,50	21,0	5,7	2,8	127,5	17,5	190,7
AUR2	14,5	7,03	56	14,1	1,22	23,0	1,5	2,1	40,3	16,9	99,1
AUR5	17,9	7,95	130	12,0	1,45	6,8	2,1	2,6	75,0	37,9	137,9
AUR23	17,2	7,19	100	10,8	1,45	9,0	1,5	2,3	64,1	33,2	122,3
AUR4	19,9	7,50	200	15,8	1,83	18,3	4,0	2,8	132,4	32,7	207,9
ORCAPT	23,0	7,35	110	13,0	1,18	5,8	10,3	4,6	59,8	32,0	126,7
ORNB	19,6	7,15	78	13,4	1,75	5,9	1,3	3,5	49,1	34,1	109,0
OR SOU	21,4	7,50	120	13,5	1,03	10,9	5,7	3,5	72,0	12,1	118,7
DD19	18,8	6,62	113	9,8	0,57	5,6	2,3	4,4	61,0	33,4	117,1
DD24	15,6	7,10	80	12,0	1,64	5,8	2,5	3,4	63,7	34,2	123,3
SALC	22,2	7,38	61	11,5	1,10	4,3	0,7	2,1	35,4	32,4	87,5
SAL2	21,5	7,70	235	14,5	1,56	21,6	4,3	4,6	115,9	32,1	194,6
SAL4	21,7	7,44	150	17,5	3,43	11,4	2,1	4,8	84,8	28,8	152,8
SALD	20,3	7,40	110	11,2	0,53	9,3	2,1	3,9	63,4	23,3	113,7
SALRMT	19,3	7,01	61	12,0	1,45	4,4	0,7	2,7	40,9	35,0	97,2
SAL26	15,3	7,25	92	19,5	1,94	7,2	0,6	2,5	61,0	16,2	108,9
SAL49	16,8	7,10	62	9,7	1,03	4,7	0,6	2,1	41,5	21,6	81,2
SAL9	21,6	6,70	120	13,2	0,69	19,2	2,9	2,5	103,4	19,0	160,9
SALCAS	21,6	7,90	210	33,0	1,07	23,0	3,3	4,3	129,9	29,9	224,5
SALB	18,4	7,23	92	17,5	0,76	9,7	1,6	3,5	49,1	20,5	102,6
SAL29	18,4	6,92	120	13,0	0,76	18,0	2,1	2,1	73,5	22,6	132,2
TEV63	14,5	6,86	90	9,0	0,50	4,8	3,1	7,1	51,9	15,9	92,2
TEV46B	15,3	7,40	62	9,4	0,50	7,4	1,2	5,0	17,4	20,5	61,3
TEV46A	15,6	6,10	70	22,6	0,38	4,0	1,0	3,9	50,6	19,7	102,2
TEV38A	15,7	7,00	58	22,8	0,50	4,4	1,0	3,2	64,1	16,8	112,8
TEV38B	15,7	7,01	70	10,0	8,57	4,1	1,2	4,6	52,2	16,1	96,8
TEV44D	15,7	6,61	90	9,7	0,38	8,0	1,8	4,0	54,9	20,1	98,8
TEV34	15,4	6,60	83	6,2	0,38	4,7	1,8	4,6	48,5	20,8	87,1
TEV38C	15,1	7,02	72	11,8	0,38	5,8	12,8	4,6	44,8	19,1	99,3
TEV38D	14,6	6,72	64	8,8	0,46	5,2	0,5	3,0	37,2	19,6	74,8
TEV44G	16,0	6,78	90	10,0	0,53	1,6	1,9	5,0	53,4	19,8	92,2
TEV46C	15,6	7,50	82	7,3	0,38	5,8	1,4	4,6	42,7	22,1	84,3
MILLBR	20,4	6,40	78	9,4	0,23	5,1	2,1	6,2	43,9	31,3	98,2

Tab.9: Résultats des analyses partielles des eaux éloignées de l'océan pendant la saison humide 1985-1986 (milligrammes par litre).

V.1.2 Etude de la mise en solution du carbone dans les eaux éloignées de l'océan.

L'ion HCO_3^- est l'ion dominant et représente bien la minéralisation globale (Fig.85).

Le mécanisme de mise en solution de ce carbone est régi par un système d'équations qui répartit le carbone selon différentes espèces en solution .



(où Me^{++} représente la charge cationique d'un carbonate solide; Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Sr^{2+} , etc...)

Ces cinq équations définissent des équilibres régis par la loi d'action de masse sur les activités chimiques. Les constantes d'équilibre, $K(1)$, $K(2)$, $K(3)$, $K(4)$ et $K(5)$ sont thermodépendantes (Plummer *et al*, 1976, Harned & Scholes, 1941; Harned & Davis, 1943) et à 25°C : $K(1)=10^{-1,47}$, $K(2)=10^{-6,4}$, $K(3)=10^{-10,3}$, $K(4)=10^{-8,3}$ (pour la calcite), $K(5)=10^{-14}$.

Rappels:

l'activité du $\text{CO}_2(\text{gaz})$ est définie comme égale à sa pression partielle $P_{\text{CO}_2(\text{gaz})}$,

l'activité de MeCO_3 , en supposant qu'il s'agit d'un solide pur, est égale à 1,

L'activité de l'ion i (a_i) en solution est définie par le produit $a_i = m_i \cdot \gamma_i$,

m_i étant la molalité (où la molarité pour les solutions diluées),

γ_i étant le coefficient d'activité (fonction de la force ionique de la solution, de l'ion considéré et de la température), il est calculé à partir de la formule de Debye - Hückel.

Il ressort de l'examen de ces équations que la solution peut être considérée comme un système qui réagit à des contraintes "extérieures".

Ces contraintes sont : - la pression partielle de $\text{CO}_{2(\text{g})}$ qui est d'environ $10^{-3,5}$ atmosphère dans l'air, et entre $10^{-0,05}$ et $10^{-3,5}$ atmosphère dans les sols du fait de l'activité biologique des plantes (Demolon, 1960; Glinka, 1963, Rightmire, 1978),

- la présence réelle ou potentielle de minéraux carbonatés que la solution peut dissoudre ou précipiter.

L'état de ce système, caractérisé par la répartition des espèces carbonatées, est révélateur des

contraintes auxquelles il est soumis.

C'est pourquoi on définit :

-la pression partielle de $\text{CO}_{2(g)}$ équilibrante qui est la pression partielle avec laquelle le système serait en équilibre,

-la saturation en minéraux carbonatés, notamment la calcite, qui traduit le pouvoir dissolvant où précipitant de la solution.

Rappel : l'indice de la saturation de la solution vis-à-vis de la calcite $I.S._{calc}$ est défini par : $I.S._{calc} = \log (P.A.I / K_s)$, où :

P.A.I. est le produit des activités ioniques des ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} ,

K_s est le produit de solubilité de la calcite ($K(4)$ du début de paragraphe).

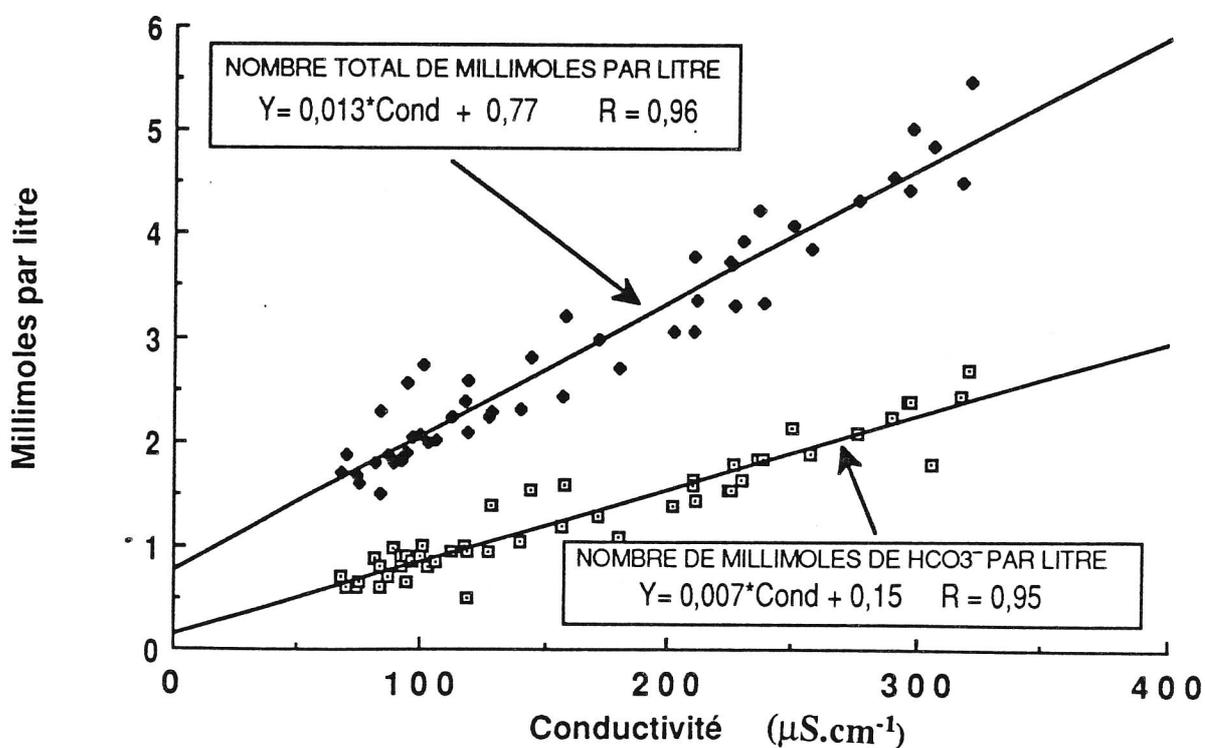


Fig.85: Teneurs en HCO_3^- et salinité Globale (millimol. l^{-1}) vs Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) dans les eaux éloignés de l'océan. La minéralisation carbonatée représente bien la minéralisation globale, elle en est la cause principale par le biais des hydrolyses.

V.1.2.1 Application aux eaux éloignées de l'océan.

Le calcul des activités ioniques, des pressions partielles de $\text{CO}_2(\text{g})$ équilibrantes ainsi que des indices de saturation (I.S.) vis-à-vis de la calcite sont le résultat de l'application du programme WATEQ F. (Tab.10 &11).

La répartition des $\log(p\text{CO}_2 \text{ équilibrantes})$ (Fig.86) montre que toutes les eaux (sauf 2) présentent des pressions partielles équilibrantes supérieures à $10^{-3,5}$ avec une moyenne de $10^{-2,59}$. Les pressions partielles sont donc représentatives d'un équilibre avec le gaz carbonique du sol.

La répartition des I.S. montre que les eaux sont très généralement sous-saturées vis-à-vis de la calcite avec une valeur moyenne de I.S. de -1,29 pour un écart type de 0,96. Un groupe de points d'eau se distingue par des I.S. particulièrement forts, c'est celui des points d'eau situés sur le rempart ouest du cirque de Cilaos. Pour ces 11 points la moyenne s'établit à -0,148 pour un écart type de 0,66. Cette famille d'eaux est très proche de la saturation en calcite. Si l'on considère à part ce groupe de points, on obtient pour les autres, une moyenne de -1,62 pour un écart type de 0,76.

L'analyse des équilibres calco-carboniques montre donc que le carbone dissous est essentiellement issu de l'activité biologique dans le sol. Les eaux du rempart de Cilaos présentent en outre des indices de saturation en calcite plus forts, qu'il est logique de relier à la présence probable de calcite hydrothermale ou au caractère plus basique des laves du secteur.

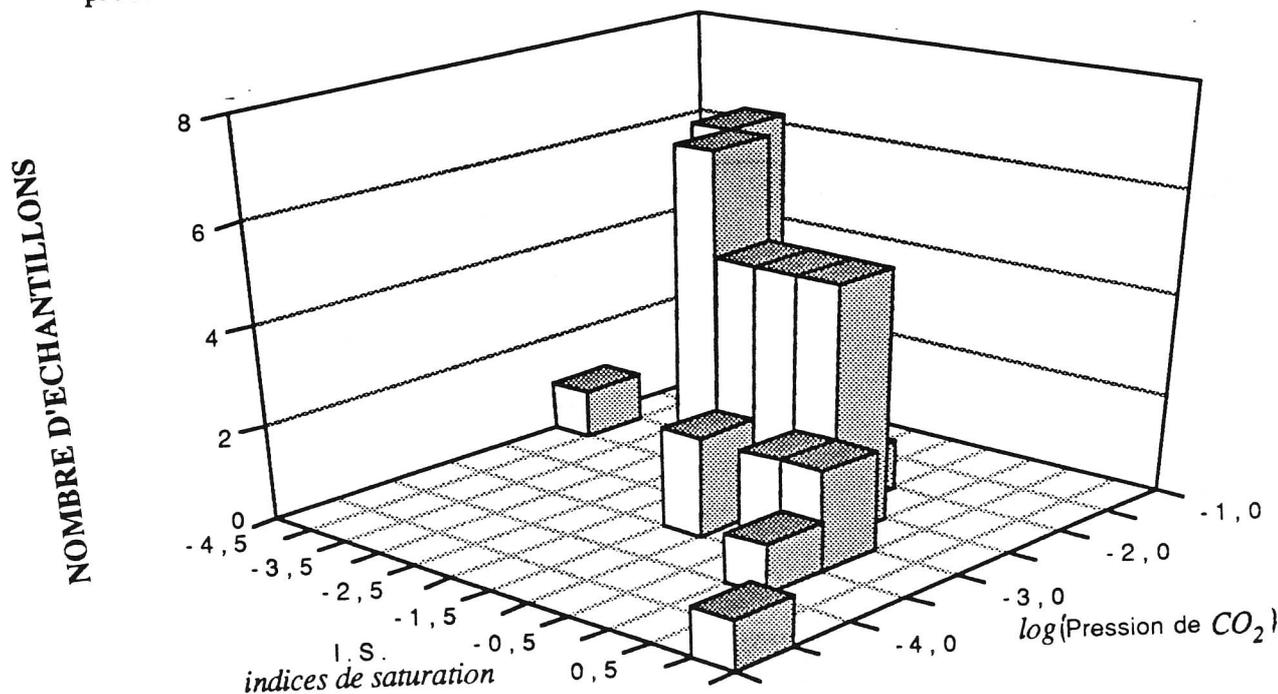


Fig.86: Histogramme des logarithmes des pressions équilibrantes de CO_2 (atmosphères) et des indices de saturation en calcite des eaux éloignées de l'océan. La répartition des pressions montre que les eaux sont généralement en équilibre avec le CO_2 des sols et sous saturées vis-à-vis de la calcite.

éléments points d'eau	Les activités (sans dimension) sont exprimées en référence à des mmol.l ⁻¹											
	++ CA	++ MG	+ NA	+ K	+ H	- CL	2- SO4	- HCO3	2- CO3	- H2CO3	0 H4SiO4	0 H3SiO4
GR ET	0,068	0,067	0,085	0,0062	0,00109650	0,195	0,000	0,049	0,0000	0,121	0,017	0,0000
RIVROCH	0,285	0,106	0,221	0,0171	0,00003310	0,286	0,015	0,617	0,0008	0,049	0,232	0,0007
RIVMAT	0,304	0,139	0,462	0,0364	0,00001730	0,094	0,047	1,497	0,0037	0,065	0,414	0,0023
CIL1	0,144	0,120	0,147	0,0641	0,00002180	0,016	0,010	0,669	0,0011	0,041	0,448	0,0012
CIL39	0,469	0,088	0,858	0,0481	0,00001170	0,000	0,061	2,220	0,0073	0,067	0,334	0,0021
CIL45	0,234	0,042	1,579	0,0651	0,00001023	0,096	0,026	2,232	0,0082	0,059	0,400	0,0028
CILB	0,427	0,157	0,858	0,0360	0,00001413	0,000	0,058	2,269	0,0062	0,082	0,321	0,0017
CILD	0,346	0,148	1,117	0,0314	0,00006918	0,011	0,019	1,701	0,0097	0,030	0,451	0,0051
CILE	0,290	0,119	0,496	0,0413	0,00001470	0,020	1,552	0,004	0,0643	0,000	0,338	0,0013
CILF	0,629	0,171	1,056	0,0669	0,00000446	0,000	0,018	2,243	0,0191	0,030	0,486	0,0066
CILG	0,395	0,154	0,382	0,0193	0,00000245	0,048	0,037	1,637	0,0254	0,010	0,581	0,0173
CIL INT	0,424	0,243	0,422	0,0169	0,00002630	0,000	0,011	2,003	0,0029	0,135	0,597	0,0017
SAL35	0,373	0,089	0,364	0,0219	0,00001621	0,166	0,007	1,220	0,0029	0,050	0,543	0,0026
SAL4	0,329	0,334	0,476	0,1085	0,00001445	0,114	0,026	1,483	0,0041	0,054	0,609	0,0034
SAL43	0,121	0,043	0,215	0,0520	0,00004168	0,034	0,004	0,578	0,0005	0,064	0,386	0,0006
SALB	0,255	0,074	0,414	0,0293	0,00003020	0,051	0,004	1,468	0,0019	0,110	0,345	0,0009
SALC	0,144	0,085	0,235	0,0469	0,00005754	0,035	0,003	0,624	0,0005	0,086	0,352	0,0006
SALD	0,246	0,105	0,365	0,0366	0,00003020	0,067	0,023	1,136	0,0016	0,082	0,325	0,0010
SALE	0,311	0,425	0,752	0,0764	0,00006676	0,045	0,138	2,204	0,0125	0,034	0,355	0,0046
SALS1	0,427	0,093	0,410	0,0217	0,00001380	0,037	0,056	2,137	0,0055	0,081	0,335	0,0015
SAL2	0,366	0,357	0,363	0,0552	0,00003020	0,114	0,055	1,948	0,0028	0,140	0,700	0,0022
SAL26	0,214	0,055	0,612	0,0220	0,00003981	0,043	0,007	0,953	0,0009	0,099	0,352	0,0006
SP1	0,215	0,251	1,546	0,0836	0,00003891	1,213	0,143	1,344	0,0015	0,124	0,764	0,0019
SP2	0,188	0,173	0,729	0,6293	0,00018197	0,948	0,054	0,990	0,0002	0,433	0,682	0,0003
SP29A	0,373	0,355	0,907	0,0406	0,000022	0,467	0,051	1,839	0,0037	0,094	0,927	0,0045
SP29B	0,297	0,343	0,816	0,0408	0,00001950	0,564	0,053	1,661	0,0037	0,076	0,911	0,0046
SP3	0,184	0,119	0,867	0,0607	0,00006456	0,616	0,049	0,992	0,0006	0,000	0,698	0,0010
SP30	0,287	0,249	0,909	0,1564	0,00017338	0,499	0,023	1,591	0,0004	0,649	0,898	0,0005
SP3A	0,180	0,155	0,825	0,0726	0,00038905	0,669	0,039	1,040	0,0001	0,973	0,898	0,0005
SP6	0,230	0,068	0,499	0,0709	0,00039811	0,431	0,020	0,715	0,0001	0,705	0,666	0,0002
SP7	0,164	0,198	1,430	0,0791	0,00003981	1,562	0,178	0,699	0,0007	0,069	0,565	0,0012
SP8	1,097	0,049	8,428	0,2904	0,00010965	9,004	0,308	1,354	0,0005	0,362	0,666	0,0005
SPBA	0,272	0,263	0,534	0,1208	0,00026915	0,395	0,025	1,316	0,0002	0,846	0,832	0,0003
SPDA	0,252	0,062	0,279	0,0490	0,00041687	0,178	0,000	0,813	0,0001	0,815	0,600	0,0001
SPPHI	0,298	0,231	0,481	0,0387	0,00002884	0,283	0,019	1,310	0,0019	0,090	0,863	0,0028
RESTA	0,208	0,053	0,205	0,0246	0,00004898	0,193	0,013	0,574	0,0005	0,065	0,415	0,0009
SMAR	0,206	0,062	0,251	0,0442	0,00006457	0,135	0,038	0,669	0,0004	0,104	0,399	0,0006
STOIN	0,211	0,107	0,234	0,0245	0,00006457	0,192	0,011	0,668	0,0004	0,102	0,366	0,0005
CILK	0,191	0,045	2,037	0,0335	0,00000631	0,100	0,389	1,652	0,0096	0,028	0,405	0,0043
AU23	0,136	0,157	0,301	0,0295	0,00010471	0,011	0,008	0,718	0,0003	0,187	0,286	0,0002
AUCAPT	0,193	0,090	0,317	0,0491	0,00014454	0,011	0,004	1,004	0,0003	0,368	0,542	0,0003
ORCAS	0,132	0,146	0,279	0,0685	0,00017338	0,200	0,064	0,906	0,0002	0,395	0,732	0,0003
ORCAP	0,097	0,174	0,234	0,0491	0,00005129	0,144	0,012	0,764	0,0006	0,099	0,731	0,0011
ORNB	0,117	0,189	0,271	0,0343	0,00002754	0,192	0,000	0,949	0,0014	0,065	0,863	0,0026
MILBB	0,126	0,195	0,200	0,0074	0,00003162	0,287	0,008	0,667	0,0008	0,052	0,266	0,0007
MILBR	0,134	0,180	0,238	0,0110	0,00003467	0,192	0,000	0,810	0,0009	0,069	0,332	0,0008
MILF	0,126	0,201	0,175	0,0098	0,00003802	0,192	0,008	0,762	0,0008	0,072	0,266	0,0006
DD24	0,281	0,178	0,166	0,0097	0,00033113	0,134	0,065	0,902	0,0001	0,785	0,399	0,0001
POCE	0,202	0,401	0,329	0,0242	0,00015849	0,189	0,011	1,457	0,0004	0,569	0,829	0,0004
PO22	0,207	0,282	0,346	0,0291	0,00010965	0,286	0,013	1,461	0,0005	0,395	0,862	0,0007
PO23	0,220	0,263	0,281	0,0292	0,00016982	0,102	0,010	1,324	0,0003	0,551	0,622	0,0003
PO35	0,248	0,403	0,328	0,0314	0,00026303	0,096	0,006	1,781	0,0003	1,092	0,642	0,0002
PO68	0,236	0,337	0,358	0,0435	0,00007943	0,285	0,014	1,540	0,0009	0,283	0,828	0,0011
POMAD	0,168	0,220	0,257	0,0659	0,00012589	0,240	0,011	1,045	0,0003	0,326	0,562	0,0004
TEV34	0,150	0,147	0,200	0,0110	0,00004169	0,718	0,004	0,856	0,0007	0,098	0,332	0,0005
TEV38A	0,151	0,135	0,279	0,0785	0,00022909	0,187	0,007	0,908	0,0001	0,552	0,383	0,0001
TEV38B	0,168	0,137	0,171	0,0098	0,00012882	0,287	0,000	0,575	0,0002	0,196	0,416	0,0002
TEV38C	0,176	0,085	0,168	0,0123	0,00025119	0,166	0,000	0,577	0,0001	0,385	0,416	0,0001
TEV43D	0,144	0,184	0,196	0,0098	0,00014454	0,200	0,000	0,814	0,0002	0,310	0,416	0,0002
TEV43G	0,147	0,138	0,217	0,0982	0,00015849	0,195	0,000	0,862	0,0002	0,360	0,399	0,0002
TEV44	0,176	0,091	0,188	0,0098	0,00001906	0,000	0,009	0,858	0,0017	0,043	0,383	0,0014
TEV46A	0,178	0,074	0,189	0,0074	0,00002630	0,000	0,000	0,842	0,0012	0,059	0,405	0,0010
TEV46B	0,129	0,071	0,189	0,0074	0,00005623	0,000	0,000	0,923	0,0006	0,141	0,387	0,0004
TEV46C	0,160	0,066	0,175	0,0098	0,00011749	0,000	0,000	1,342	0,0004	0,426	0,438	0,0002
TEV63	0,154	0,091	0,230	0,0492	0,00048978	0,190	0,000	0,768	0,0001	0,998	0,416	0,0001
MACIL	0,465	0,123	0,328	0,0411	0,00000040	0,173	0,051	0,886	0,0969	0,008	0,411	0,1021
MOYENNE	0,250	0,163	0,598	0,0548	0,000113	0,358	0,059	1,158	0,0048	0,241	0,516	0,0031
Ecarttype	0,151	0,099	1,054	0,0835	0,000167	1,118	0,198	0,537	0,0145	0,277	0,205	0,0126

Tab.10: Activités des principales espèces ioniques en solution dans les eaux les moins minéralisées de la saison sèche 1986.

EAUX COTIERES				EAUX ELOIGNEES DE L'OCEAN			
NOMS	SALINITE milligrammes par litre	LOGPCO2 atmosphères	IS CALC indice de saturation en calcite	NOMS	SALINITE milligrammes par litre	LOGPCO2 atmosphères	IS CALC indice de saturation en calcite
5X05	336,2	-1,78	-1,08	AU23	83,6	-2,35	-2,01
BOUC9	621,4	-1,84	0,07	AUCAP	119,0	-2,07	-1,87
CHCAR	550,4	-3,55	0,89	ORCAS	135,8	-2,03	-2,15
CM18	762,9	-1,97	-0,28	ORSOU	95,7	-2,50	-2,20
CM52	797,9	-2,24	-1,14	ORCAP	118,9	-2,64	-1,84
COLIM	421,0	-2,89	-0,88	ORNB	139,3	-2,80	-1,37
CM9	714,1	-2,20	-0,69	RIVMAT	165,6	-2,79	-0,51
ES20	2047,8	-2,07	0,23	SAL35	151,3	-2,93	-0,56
ES19	1886,4	-2,04	0,69	SAL43	78,0	-2,86	-1,82
ES29	470,9	-1,93	-0,33	SALB	144,8	-2,58	-0,89
ES 32	521,4	-2,08	-0,57	SALC	82,3	-2,66	-1,75
ES36	460,8	-2,06	-0,87	SALD	123,8	-2,68	-0,98
ES36V	900,9	-2,59	0,97	SALE	233,5	-3,08	0,01
FUM	826,9	-1,92	-0,96	SALS1	178,2	-2,78	-0,26
GRRAV	315,7	-2,75	-1,21	SAL2	229,6	-2,44	-0,56
PORT52	234,6			SAL26	114,0	-2,66	-1,32
PORT F5	1192,8	-1,71	-1,10	GR ET	18,9	-2,46	-4,40
POSS36	316,0	-1,93	-0,92	RIVRO	91,4	-2,90	-1,21
POSSP35	439,9	-1,20	-0,96	MILLBB	87,1	-2,90	-1,55
SC3	1651,8	-2,94	-0,44	MILBR	98,4	-2,77	-1,48
SG15	795,2	-2,71	0,34	MILF	90,5	-2,76	-1,57
SG18	246,8	-3,01	-0,88	DD24	118,6	-1,76	-2,16
SG19	501,6	-2,03	0,04	POCE	184,8	-1,86	-1,70
SG20	3019,3	-2,15	0,62	PO22	188,4	-2,02	-1,53
SG4	349,6	-1,78	-1,33	PO23	154,9	-1,87	-1,73
SG43	536,0	-2,83	-0,29	PO35	193,5	-1,53	-1,68
SG56	377,1	-2,38	-0,72	PO68	196,2	-2,11	-1,23
SG6N	378,7	-2,69	-0,63	POMAD	135,6	-2,10	-1,83
SG6R	269,0	-2,18	-0,80	TEV34	118,9	-2,70	-1,60
SGP12	1993,9	-1,75	0,29	TEV38A	110,7	-1,92	-2,27
SGP14	789,8	-2,57	-0,61	TEV38B	90,6	-2,37	-2,17
SGP15	1343,3	-2,04	0,45	TEV38C	83,3	-2,08	-2,44
SL38	1849,5	-3,00	-0,42	TEV43D	100,9	-2,17	-2,13
SL41B	628,8	-2,72	-1,08	TEV43G	102,5	-2,10	-2,14
SL5	649,5	-2,28	-1,81	TEV44	94,8	-3,02	-1,13
SP1	271,4	-2,49	-1,06	TEV46A	93,3	-2,90	-1,31
SP2	189,5	-1,96	-1,93	TEV46B	94,7	-2,53	-1,75
SP29A	273,9	-2,58	-0,40	TEV46C	125,8	-2,05	-1,81
SP29B	259,1	-2,69	-0,51	TEV63	98,1	-1,67	-2,67
SP3	174,8	-2,41	-1,50	MACIL	186,1	-4,66	1,10
SP30	239,4	-1,76	-1,50	CIL1	87,7	-3,09	-1,46
SP3A	177,5	-1,60	-2,26	CIL39	225,5	-2,82	-0,07
SP6	124,9	-1,77	-2,36	CIL45	236,7	-2,88	-0,32
SP7	218,6	-2,78	-1,52	CILB	226,6	-2,73	-0,18
SP8	872,0	-2,04	-0,83	CILD	198,3	-3,16	-0,07
SPBA	203,9	-1,66	-1,81	CILE	155,3	-2,90	-0,62
SPDA	119,9	-1,68	-2,25	CILF	268,2	-3,22	0,45
SPPHI	193,1	-2,63	-0,81	CILG	178,2	-3,63	0,40
SSTLEU	315,0	-1,52	-0,95	CIL?	209,0	-2,51	-0,50
RESTA	88,9	-2,75	-1,50	CILK	232,7	-3,23	-0,35
SMAR	98,8	-2,58	-1,62				
STOINET	96,3	-2,57	-1,59				

Tab.11: Logarithmes des pressions de CO₂ équilibrantes et indices de saturation vis-à-vis de la calcite dans les eaux côtières et dans les eaux éloignées de l'océan au cours de la saison sèche 1986.

V.1.3 L'hydrolyse des minéraux silicatés.

V.1.3.1 Généralités.

Les minéraux silicatés sont **très peu solubles** dans l'eau pure; par exemple, la forstérite a un produit de solubilité de 10^{-12} (*Handbook of Chemistry and physics*, 1985)). L'altération n'est rendue possible que par l'intervention des **réactions chimiques d'hydrolyse**. Celles-ci se résument en une consommation d'ions H^+ , une libération de cations et parfois de silice. La vitesse d'altération est conditionnée par l'espèce minérale en cours d'hydrolyse, la température de réaction et la vitesse de percolation de la solution. Empiriquement, une **séquence de stabilité** des minéraux est établie (Goldich, 1938). Par stabilité croissante:

Olivine		Plagioclase-Ca
Augite		Plagioclase-Ca-Na
Hornblende		Plagioclase-Na-Ca
Biotite	Plagioclase-Na	
	Feldspaths	
	Muscovite	
	Quartz	

Les produits de l'altération sont des minéraux secondaires, ils traduisent un réarrangement de l'aluminium avec le silicium dans de nouvelles proportions. Les minéraux néoformés montrent un appauvrissement en cations, puis en silice par rapport aux ions aluminium. Il est possible de définir des "séquences" d'altération :

Pour les feldspaths, les minéraux néoformés par degré croissant d'altération sont (Tardy, 1969):

séricite \Rightarrow vermiculite \Rightarrow montmorillonite \Rightarrow kaolinite \Rightarrow gibbsite

Pour les minéraux ferromagnésiens (péridots, pyroxènes):

chlorite \Rightarrow vermiculite \Rightarrow montmorillonite \Rightarrow kaolinite & goethite

De fait, le type de minéral d'altération rencontré dans les profils est surtout déterminé par la mobilité relative de la silice, par rapport à l'aluminium et aux cations souvent souvent dénomés sous le terme de bases (Pedro, 1966). Or cette mobilité relative dépend elle même de l'intensité du drainage et des températures.

En climat tropical humide, le drainage est intense et la température élevée. Les séquences d'altération atteignent leurs termes avec la formation d'hydroxydes comme la gibbsite .

Sous un climat tempéré, l'altération atteint rarement le stade de la gibbsite et la silice est partiellement "piégée" sous forme de kaolinite lorsque le drainage est important (cf.Fritz, 1976).

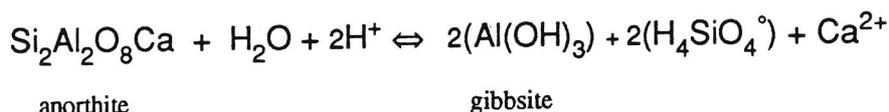
Par contre dans des profils peu lessivés, les solutions drainantes relativement concentrées fournissent les conditions nécessaires à la présence d'argiles à deux couches comme la montmorillonite.

V.1.3.2 Diagrammes de stabilité.

V.1.3.2.1 Principes.

La connaissance des réactions chimiques en jeu et de leurs paramètres thermodynamiques permet l'établissement de diagrammes de stabilité.

Par exemple, pour l'hydrolyse de l'anorthite en gibbsite, la réaction s'écrit :



Rappels:

Les activités sont égales à 1 pour les phases solides et pour l'eau (ceci n'est valable que pour des corps purs ce qui est loin d'être le cas dans la nature).

Le pH est défini comme le logarithme décimal de l'inverse des activités en ions H^+ .

La constante de réaction, K , est égale à : (\mathcal{A} est le symbole de l'activité)

$$K = (\mathcal{A}(\text{Ca}^{2+}) \cdot \mathcal{A}(\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ) \cdot \mathcal{A}(\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ)) / (\mathcal{A}(\text{H}^+) \cdot \mathcal{A}(\text{H}^+))$$

ce qui, en logarithmes décimaux, peut s'écrire :

$$\log_{10}(K) = \log_{10}(\mathcal{A}(\text{Ca}^{2+})) + 2 \cdot \log_{10}(\mathcal{A}(\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ)) + 2 \cdot \text{pH}$$

Si K , la constante d'équilibre, est connue, la relation définit, pour une température donnée les domaines de stabilité des deux espèces minérales dans une solution avec des $\mathcal{A}(\text{Ca}^{2+})$, $\mathcal{A}(\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ)$ et $\mathcal{A}(\text{H}^+)$ connues.

Des relations similaires sont définies pour les différents équilibres entre minéraux. Elles sont résumées ci-dessous (Fritz, 1976; Fritz & Tardy, 1973):

Réactions d'hydrolyses	coefficients stoechiométriques			log ₁₀ de la constante
	H ₄ SiO ₄	cation	H ⁺	d'équilibre (25°C)
Anort. ⇌ mont.Ca	(-) 4	3	6	+67,82
Anort. ⇌ kaolinite	0	1	2	+17,28
Anort. ⇌ gibbsite	2	1	2	+ 8,23
Mont. Ca ⇌ kaolinite	8	1	2	-14,67
Mont. Ca ⇌ gibbsite	2 2	1	2	-78,02
Albite ⇌ mont.Ca	5	3	3	+ 4,27
Albite ⇌ kaolinite	2	1	1	+ 0,23
Albite ⇌ gibbsite	3	1	1	- 4,29
Mont. Na ⇌ gibbsite	1 1	1	1	-38,56
Kaolinite ⇌ gibbsite	1	0	0	- 4,52
SiO ₂ am. ⇌ H ₄ SiO ₄	1	0	0	- 2,71
Feldspath K ⇌ kaolinite	2	1	1	- 2,42

V.1.3.2.2 Application aux eaux éloignées des côtes.

Les activités calculées par le programme WATEQ.F (Tab.10) sont reportées dans des diagrammes logarithmiques du type (activité du cation/pH) vs activité (H_4SiO_4) où les relations d'équilibre apparaissent sous forme de droites (Fig.87,88,89,90).

Le report des points dans les diagrammes fait clairement apparaître que la majorité des eaux se situe dans le domaine de la kaolinite, ce qui est d'ailleurs le cas de la plupart des eaux continentales (Garrels & Christ, 1965). Il peut paraître surprenant que les eaux ne se placent pas dans le domaine de la gibbsite, au moins pour les sources de la côte est où le sol est soumis à un lessivage intense sous une température élevée.

L'examen de la phase minérale d'altération dans les sols réunionnais montre une organisation en une séquence générale des sommets jusqu'au rivage (Gense, 1976):

imogolite et gibbsite \Rightarrow halloysite \Rightarrow métahalloysite \Rightarrow montmorillonite

rappels : L'imogolite est une espèce minérale intermédiaire entre l'allophane (le gel de silice) et la kiliachite, est un alumino-silicate hydraté avec un rapport SiO_2/Al_2O_3 proche de 1 (Wada, 1982 in Rosello, 1984).

L'halloysite est un minéral voisin de la kaolinite, mais hydraté à feuillets épais de 1 nm (Foucault et Raoult, 1980).

Dans le détail, cette séquence varie suivant la roche mère, et l'intensité du lessivage des sols : par exemple la montmorillonite est absente sur la côte est. Sur le versant ouest, elle est présente aux altitudes inférieures à 150 m sur la série différenciée et 400 m sur les océanites (Gense, 1976; Rosello, 1984).

La séquence définie est proche de la séquence classique mais présente des espèces minérales originales du fait de la présence dominante des allophanes dans les profils d'altitude.

Les points situés dans le domaine de la montmorillonite-Ca et de la montmorillonite-Mg dans les diagrammes 89 et 90 sont au nombre de 11:

l'un d'entre eux provient d'une eau superficielle visiblement polluée (MACIL),

deux sont des échantillons issus de sources situées dans les océanites des "hauts" de la Possession (Poss68 et Poss22) (altitudes inférieures à 500 m),

Les huit autres sont des sources des remparts des trois cirques situées à des altitudes supérieures à 750 m en ce qui concerne les cirques de Cilaos (CiIF, CiIG, CiIINT, CiIK) et de Mafate (OrNB, OrCAP). Si le contact avec les océanites peut être évoqué pour toutes ces sources, leur altitude élevée rend la présence de montmorillonite sur leur bassin versant peu probable.

En conclusion les compositions des eaux des sources pour la saison sèche 1986 montrent que dans la plupart des cas, les eaux sont situées dans le domaine de stabilité de la kaolinite, que l'on retrouve dans les profils sous forme de halloysite et métahalloysite. Le fait que les eaux ne se placent pas dans le domaine de la gibbsite, qui est le minéral dont on s'attendrait à observer la prédominance dans les sols soumis à un lessivage si intense, pourrait être expliqué par la présence de l'imogolite (qui ne peut intervenir dans le diagramme de stabilité puisqu'on ne connaît pas ses caractéristiques thermodynamiques). Enfin, les andosols sont des sols jeunes, or les diagrammes de stabilité sont définis pour des phases minérales bien déterminées, alors que dans le cas présent elles sont en cours d'évolution, comme le montre la proportion d'allophanes.

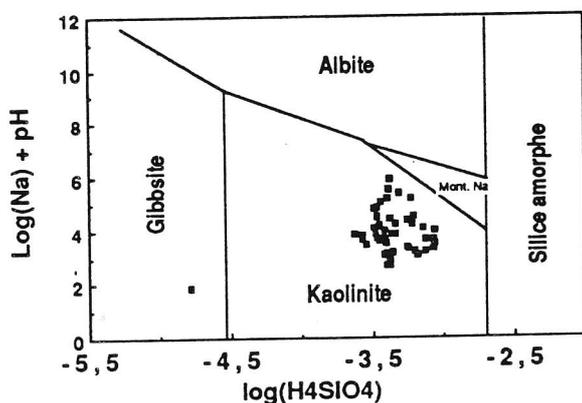


Fig.87: Diagramme d'équilibre des espèces silicatées sodiques.

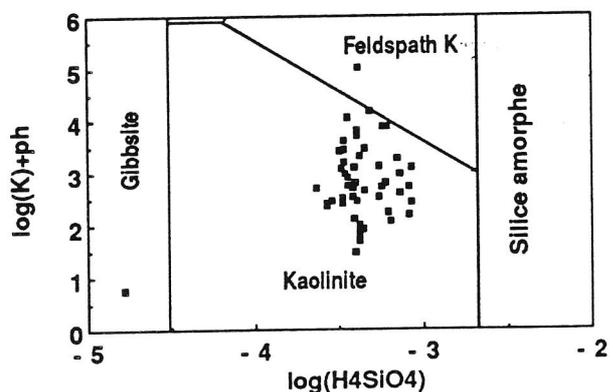


Fig.88: Diagramme d'équilibre des espèces silicatées potassiques. Toutes les eaux sont dans le domaine de stabilité de la kaolinite.

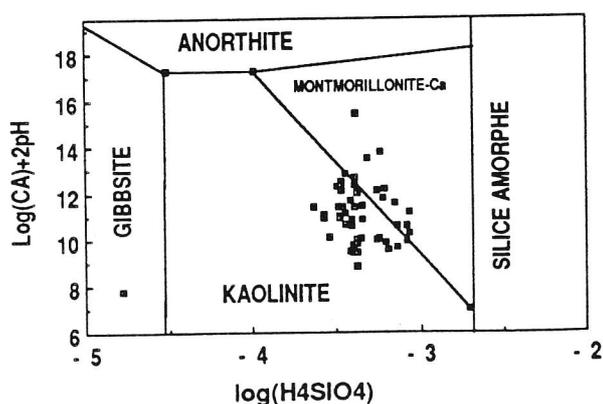


Fig.90: Diagramme d'équilibre des espèces silicatées calciques.

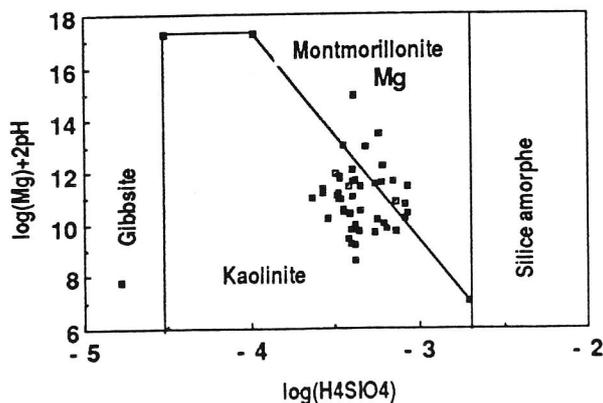


Fig.90 Diagramme d'équilibre des espèces silicatées magnésiennes.

V.1.3.3 Recherche des pôles minéraux de minéralisation.

V.1.3.3.1 Pôles géochimiques et pôles minéralogiques.

La différenciation magmatique fournit un schéma global d'évolution géochimique des laves du massif du Piton des Neiges. En ce qui nous concerne, quatre faciès pétrographiques peuvent résumer l'évolution du magma (Fig.91). Les essais de détermination des coefficients de mobilité par élément selon la méthode préconisée par Tardy (1969) se sont révélées extrêmement décevants, ces coefficients variant considérablement d'une roche à l'autre. L'échec ne s'explique que par l'intervention des phases minérales dans la mobilité des éléments, c'est pourquoi nous avons eu recours aux analyses modales. La moyenne des analyses modales disponibles (Nativel, 1978), faciès par faciès et en regroupant méso et métastase, fournit les valeurs suivantes :

	Océanites	Hawaïtes	Mugéarites	Trachytes
Olivine	24,7%	7,0%	5,4%	0%
Pyroxènes	27,6%	24,4%	14,7%	12,9%
Feldspaths	33,1%	50,8%	65,6%	75,3%
Opacques	14,9%	17,5%	11,8%	13,0%

Si à ces analyses modales, on associe les moyennes des analyses des minéraux effectuées à la micro-sonde (Nativel, 1978), par faciès:

	Océanites	Hawaïtes	Mugéarites	Trachytes
Fortérite	85,8%	60,7%	53,9%	0,2%
Pyroxène Ca	42,6%	45,5%	44,5%	45,5%
Pyroxène Mg	44,3%	40,2%	34,2%	30,9%
Anorthite	63,7%	73,9%	71,4%	10,0%
Albite	34,8%	24,0%	27,0%	63,1%
Orthose	0,6%	0,9%	1,7%	24,6%

il devient possible d'obtenir, faciès par faciès, une estimation de la "présence" des minéraux contenant les éléments que nous avons analysés dans l'eau.

	Océanites	Hawaïtes	Mugéarites	Trachytes
Forstérite	27,1%	5,6%	3,6%	0,0%
Pyroxène Ca	15,0%	14,7%	8,2%	7,0%
Pyroxène Mg	15,6%	13,0%	6,3%	4,8%
Anorthite	26,9%	49,8%	58,4%	9,0%
Albite	14,7%	16,2%	22,1%	57,0%
Orthose	0,6%	0,6%	1,4%	22,2%

L'analyse des cortex d'altérations par Rosello (1984) fait apparaître plusieurs ordres d'altération des minéraux:

- dans les "basaltes à olivine" les vitesses d'altération des olivines et des feldspaths sont comparables;
- dans les basaltes contenant peu d'olivine l'altération affecte les feldspaths plus rapidement que les olivines.

Cette observation est en concordance avec la séquence de Goldich (1938) si l'on admet :

- que l'altérabilité relative des olivines dépend de leur teneur en fayalite (plus les olivines sont ferrifères et moins elles sont altérables),
- que l'altérabilité relative des feldspaths dépend de la plus grande présence du pole anorthite dans la lave (comme dans les Hawaïtes).

Les minéraux sont donc par ordre d'importance, et suivant les faciès :

Océanite	Hawaïte	Mugéarite	Trachyte
Forstérite	Anorthite.	Anorthite.	Albite
Anorthite	Albite	Albite	Orthose
Pyroxènes	Pyroxènes	Pyroxènes	Anorthite
Albite	Forstérite	Forstérite	Pyroxènes
Orthose	Orthose	Orthose	(Forstérite.)

Il apparaît déjà au regard de ce classement que hawaïtes et mugéarites ont le même ordre de présence relative de minéraux.

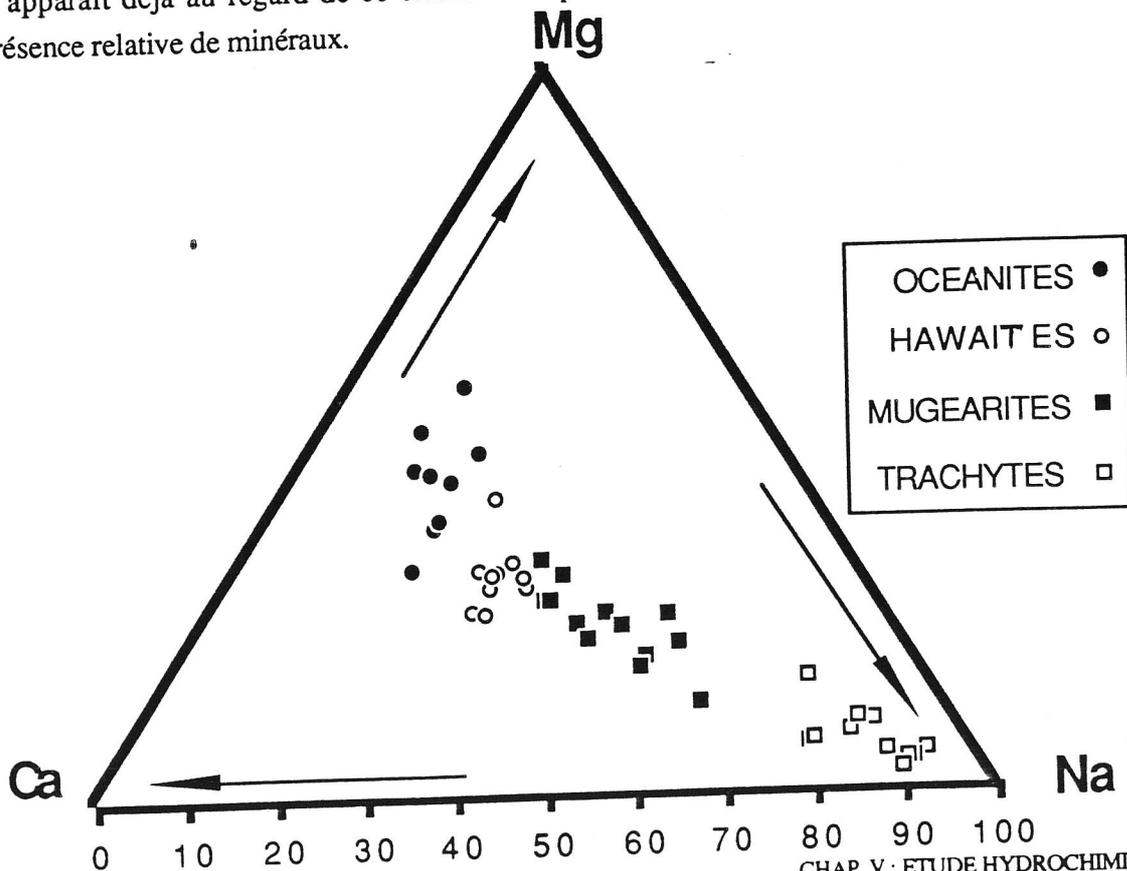


Fig.91: Géochimie de quatre faciès pétrographiques des laves
 La différenciation magmatique se traduit par une évolution des teneurs en "bases", évolution que l'on va rechercher dans les eaux souterraines en fonction des terrains qu'elles lessivent.

V.1.3.3.2 Critères de reconnaissance géologique des points d'eau éloignés de l'océan.

Les points d'eau ont parfois des situations géologiques qui permettent d'affirmer que leurs compositions chimiques reflètent l'interaction avec un certain type de roche.

C'est le cas des sources des "hauts de la Possession" dont le bassin versant est uniquement constitué de laves à olivine (échantillons poss68, poss22, possCE, pomad , *etc....*).

C'est également le cas des sources issues du "Voile de la Mariée" dans le cirque de Salazie car leur bassin versant contient des trachytes (échantillons SalC,SalD, SalB).

Les points d'eau du Tévelave (hauts d'Etang-salé) montrent un bassin versant essentiellement constitué d'hawaïtes et de mugéarites, avec contacts possibles avec des océanites (Mairine, 1983) (échantillons Tev 63,*etc...*).

Enfin les points d'eau CilK et Cil 45 sont situés au contact d'un dyke de syénite implanté dans les océanites.

V.1.3.3.3 Représentation de Piper.

V.1.3.3.3.1 Echantillons de la saison sèche 1986

Le report des proportions cationiques en meq.l⁻¹ , (An.30), dans un diagramme triangulaire regroupant les pôles Mg, Ca et (Na+K) (fig.92) fait apparaître un regroupement des points en fonction des groupes définis dans 1.3.3.2. En effet en partant du pôle magnésien, les eaux ayant lessivé les océanites forment un pôle magnésien relatif, les eaux du Tévelave sont un peu plus calciques (hawaïtes et mugéarites) et les eaux qui se sont trouvés un contact avec les trachytes sont enrichies en Na⁺, enfin le contact avec les syénites montre un enrichissement extrême en Na⁺ et K⁺. La tendance géochimique observée dans les laves (fig.91) se retrouve donc bien dans la chimie des eaux de la saison sèche.

V.1.3.3.3.2 Echantillons de la saison humide 1985-86

Le report des compositions cationiques relatives (An.31) dans un diagramme triangulaire fait apparaître (Fig.93) un groupe relativement homogène où les groupes de points définis en §V.1.3.3.2 sont indifférenciables. Par rapport aux compositions de saison sèche, les eaux sont très généralement enrichies en Na⁺. Une erreur systématique entre les deux séries de mesures a pu intervenir; néanmoins cela est peu probable du fait que les balances cationiques sont du même ordre.

Si l'on écarte l'hypothèse d'erreur analytique systématique, deux phénomènes peuvent expliquer

cet enrichissement :

-premièrement, pendant la saison humide, la température est plus forte ce qui peut favoriser l'hydrolyse des plagioclases par rapport à celle des ferromagnésiens,

-deuxièmement, pendant la saison humide, le ruissellement superficiel intervient d'une manière plus importante dans l'échantillonnage. Or les niveaux de surface des versants du Piton des Neiges sont très souvent composés d'épanchements pyroclastiques acides frais puisque jeunes et tardifs comme le "tuf à débris de feldspath" signalé en de multiples endroits (Bachelery, 1981; Rosello, 1984) à des profondeurs variant de 20 à 60 cm.

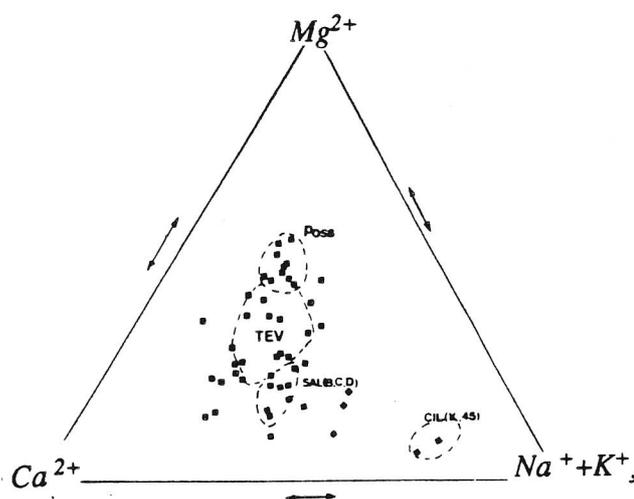


Fig.92: Diagramme triangulaire des teneurs en Mg^{2+} , Ca^{2+} , $Na^{+}+K^{+}$ ($meq.l^{-1}$) des eaux de la saison sèche (éloignées de l'océan). Il apparaît que les groupes des points d'eau définis par la géologie de leur bassin versant suivent la tendance générale observée pour les roches (Fig.91).

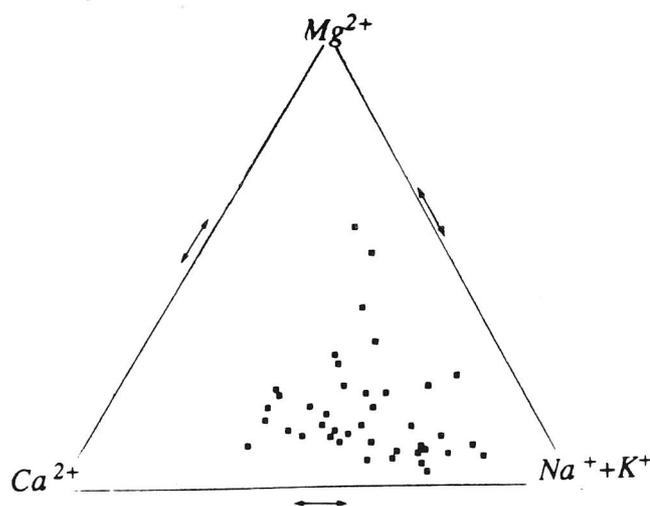


Fig.93: Diagramme triangulaire des teneurs en Mg^{2+} , Ca^{2+} , $(Na^{+}+K^{+})$ ($Meq.l^{-1}$) des eaux de la saison humide 1985-1986 (éloignées de l'océan). Les points d'eau apparaissent globalement enrichies en Na^{+} , par rapport à la saison sèche et les groupes géologiques de points d'eau ne montrent plus un comportement cohérent. Ces changements pourraient être attribués à la composante ruissellement qui mélangerait les pôles géologiques.

V.1.3.3.4 Détermination des minéraux en cours d'hydrolyse.

V.1.3.3.4.1 Méthode employée.

La méthode choisie est celle employée par Wackermann (1980,1981,a paraître) (Wackermann & Tremblay,1982). Il apparaît que "lorsque les phénomènes de néoformations minérales sont d'importance réduite à l'égard des apports dus aux dissolutions des minéraux, primaires ou secondaires, les points figuratifs du couple de valeurs concentration-conductivité sont répartis, pour chaque élément, sur une famille (...)" de droites parallèles en coordonnées bilogarithmiques. La pente de la droite, **a**, est fixée par élément, l'ordonnée à l'origine, **b**, est relative à une espèce minérale en cours d'hydrolyse. Les coefficients **a** et **b** (données pour des mol.l⁻¹ et des μs.cm⁻¹) déterminés pour les espèces minérales primaires présentes dans les laves du Piton des Neiges sont:

Cations	Mg ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺
pentés	1,36	1,18	1,20	0,940
Ordonnées à l'origine (mol.l⁻¹.μS.cm⁻¹.10⁻⁶)				
olivine (Forst.90%)	0,8106			
albite		1,7650		
orthose				1,339
clinopyroxène (Ca 50%)	0,3565		1,5350	
bytownite		0,1240	1,0840	
andésine		0,7629	0,6779	
oligoclase		1,2020	0,4189	
calcite			3,1050	

La méthode permet théoriquement de déterminer "la liste des espèces minérales en cours de dissolution présentes dans la formation drainée".

V.1.3.3.4.2 Application au minéraux magnésiens.

Dans le diagramme bilogarithmique Mg²⁺ en fonction de la conductivité électrique de l'eau (Fig.94), la plupart des points apparaissent entre les droites d'hydrolyse de l'**olivine** (forst 90%) et du **clinopyroxène** (Ca 50%) qui sont les seuls pourvoyeurs possibles en magnésium.

Les points d'eau au contact avec la **syénite** ont des valeurs qui les situent en dessous de la droite du **clinopyroxène**.

Les points d'eau dont le bassin versant est composé uniquement d'**océanites** présentent des valeurs qui les placent plus près de la droite définie pour l'**olivine** (forst 90%) .

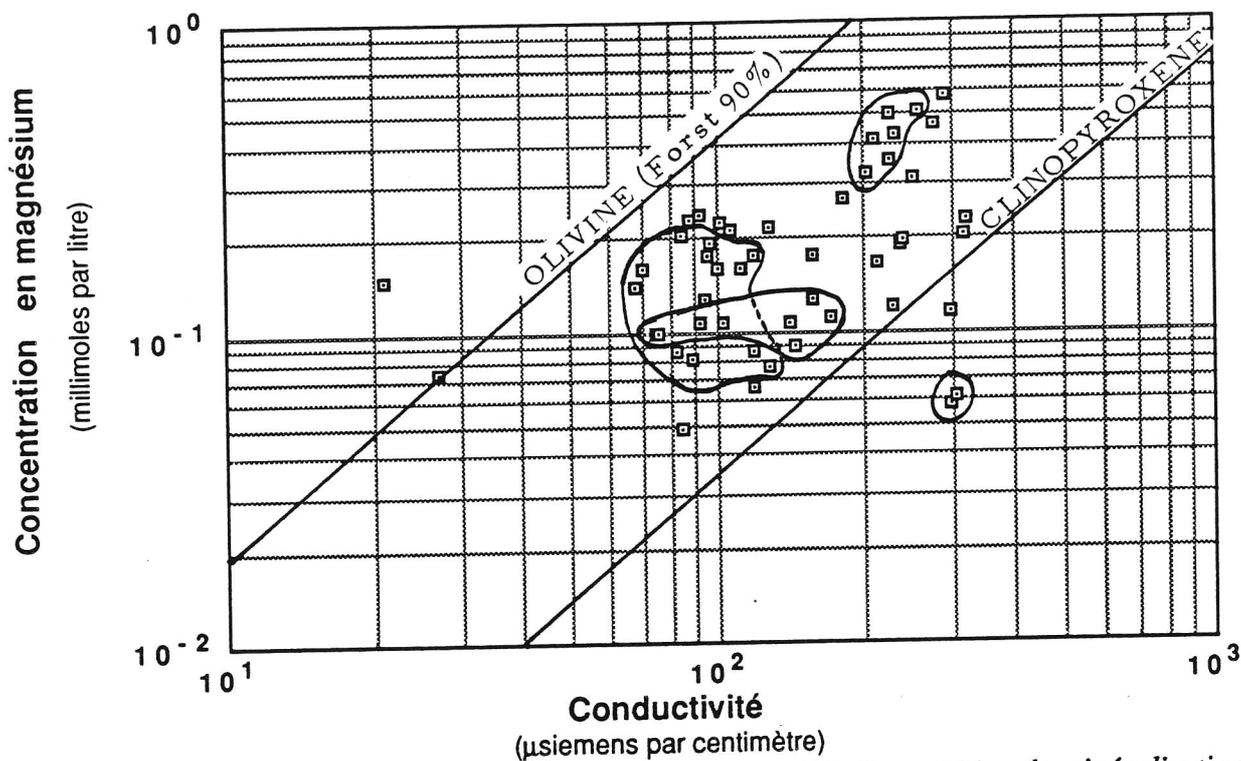


Fig.94: Report des groupes de points d'eau dans le modèle d'acquisition de minéralisation de l'eau de Wackerman (1981). Minéraux magnésiens. Les groupes ont un comportement cohérent avec les roches de leurs bassins versants.

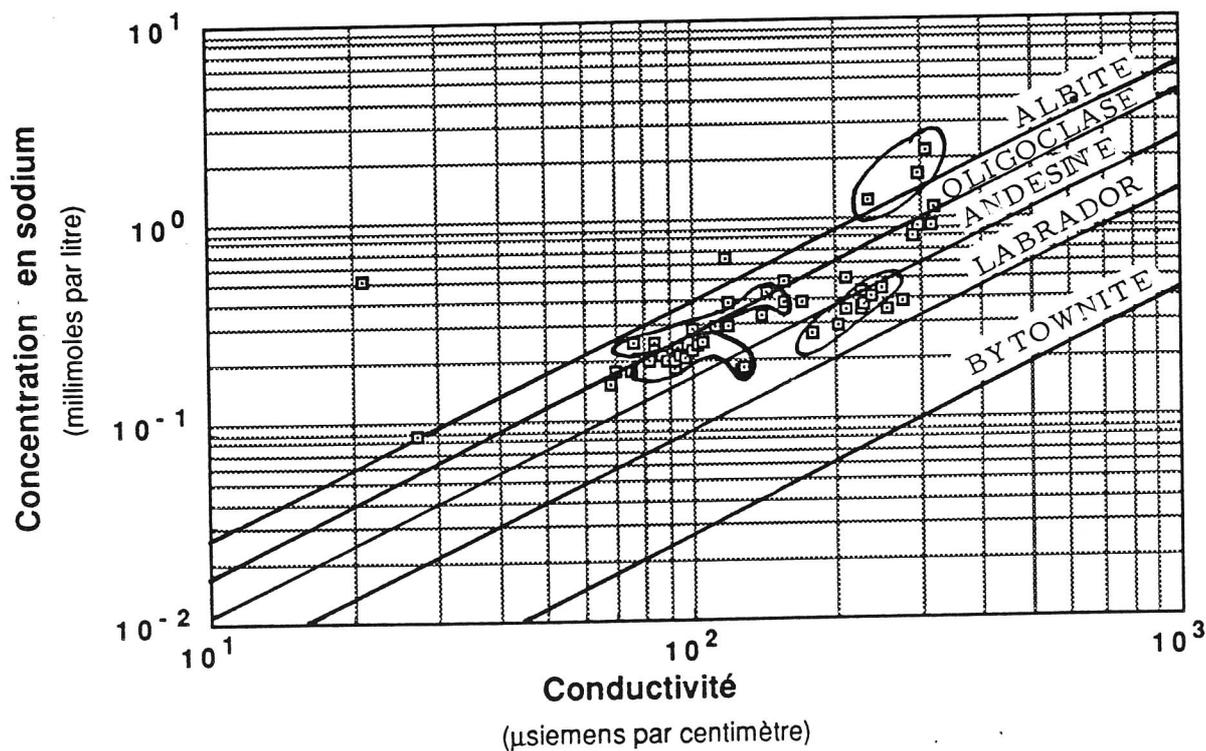


Fig.95: Report des groupes de points d'eau dans le modèle d'acquisition de minéralisation de l'eau de Wackerman (1981). Minéraux sodiques. Les groupes ont un comportement cohérent avec les roches de leurs bassins versants.

Les points d'eau du Tévelave forment un groupe de points qui s'étire entre les deux droites. Les points d'eau représentatifs du "Voile de la mariée" du cirque de Salazie se situent à l'extrémité descendante de cet étirement. En conclusion, la situation des points sur le diagramme donne des indications sur la présence plus ou moins affirmée des ferromagnésiens. Les points ne s'alignent pas vraiment selon des droites bien définies, mais nous avons vu que certaines des eaux des "hauts de la Possession" sont en équilibre avec la montmorillonite-Mg, ce qui impose une localisation des points en dessous des droites d'hydrolyse. Enfin, l'olivine des océanites, et *a fortiori* celle des hawaïtes et des mugéarites, est moins magnésienne que celle définie pour la droite théorique du schéma.

V.1.3.3.4.3 Application aux minéraux sodiques.

Le report des points, concentration en Na^+ en fonction de la conductivité, (Fig.95) fait apparaître que les points se situent généralement entre les droites d'hydrolyse du labrador et de l'albite.

-Les points d'eau avec un bassin versant contenant uniquement des **océanites** se situent tous entre les droites de l'**andésine** et du **labrador**.

-Les points d'eau du Tévelave (bassins versant formés d'hawaïtes et de mugéarites) se situent majoritairement entre les droites définies pour les hydrolyses de l'**andésine** et de l'**oligoclase**.

-Les points représentatifs des échantillons du "Voile de la Mariée" se situent proches de la droite de l'**oligoclase**.

- Les points montrant un contact avec les syénites se situent au-dessus de la droite définie pour l'**albite**.

En conclusion, les points définis par les couples (Na^+ /conductivité) montrent une grande cohérence avec le modèle. Le pôle **albite** est le seul pourvoyeur de sodium, il est significativement présent et évolue tout au long de la série de la différenciation magmatique, ceci explique pourquoi les domaines attribués aux différentes laves se recoupent peu.

V.1.3.3.4.4 Application aux minéraux calciques et potassiques.

Les couples conductivité, Ca^{2+} et conductivité, K^+ ne répondent pas aux prédictions du modèle puisque les points, en coordonnées bilogarithmiques, ne s'alignent pas près des droites définies par les minéraux calciques et potassiques présents dans la roche (Fig. 96 et 97). Par exemple, les eaux qui ont lessivé des océanites se situent près de la droite de l'oligoclase dans le diagramme des minéraux calciques, alors que les plagioclases rencontrés dans ce type de laves sont beaucoup plus calciques. De même dans le diagramme des minéraux potassiques, les points ne semblent pas s'ordonner

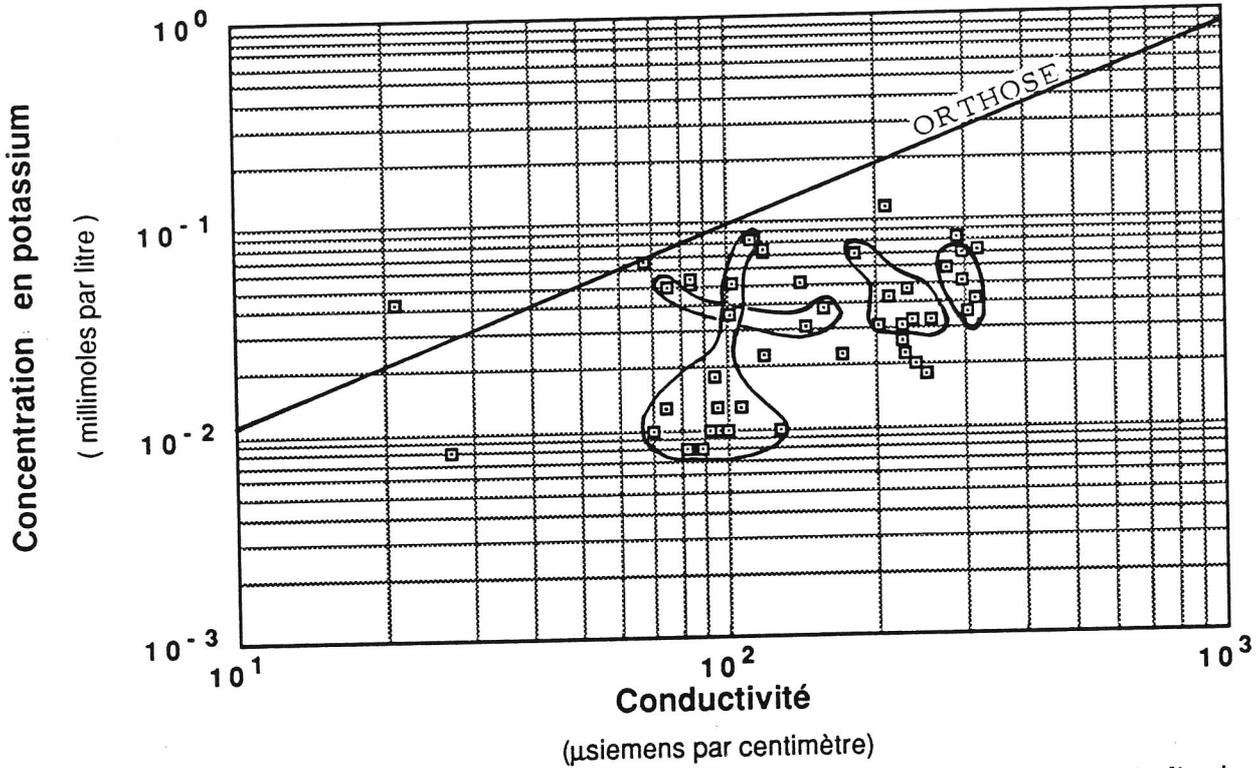


Fig.97: Report des groupes de points d'eau dans le modèle d'acquisition de minéralisation de l'eau de Wackerman (1981). Minéraux potassiques.

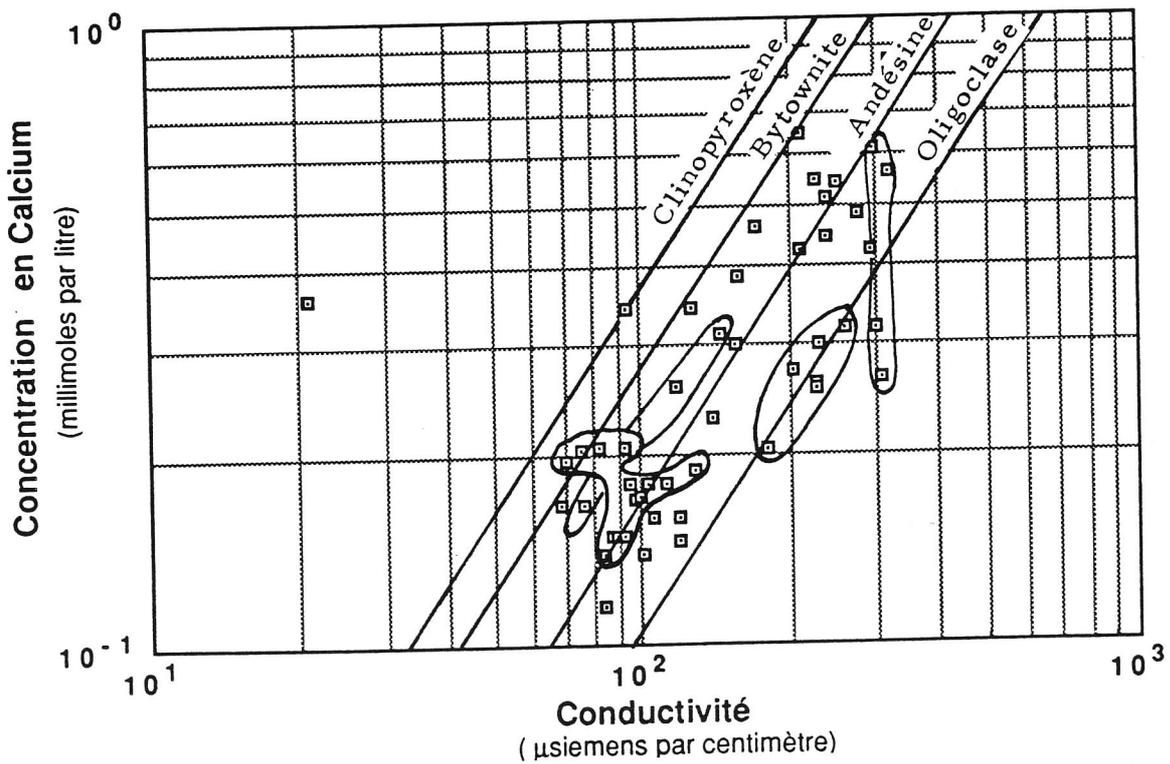


Fig.96: Report des groupes de points d'eau dans le modèle d'acquisition de minéralisation de l'eau de Wackerman (1981). Minéraux calciques.

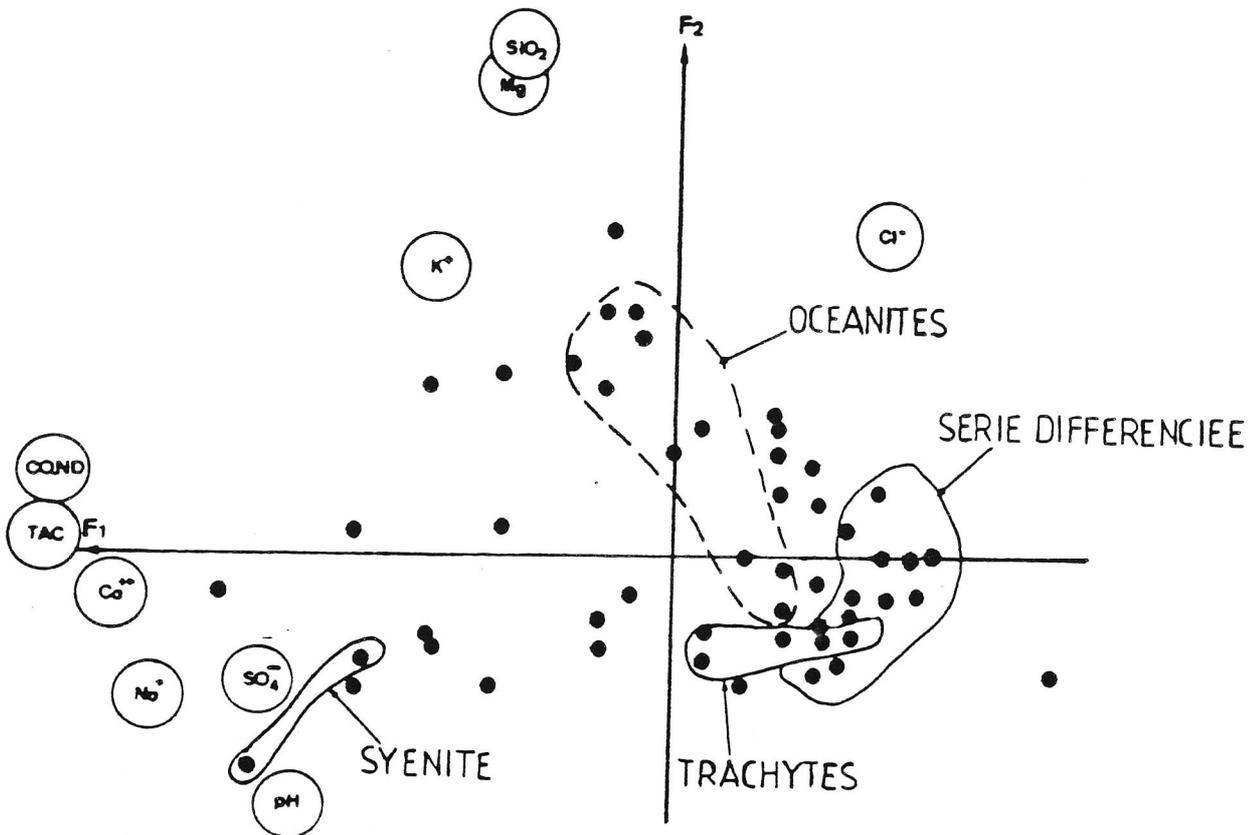


Fig.98: Résultats de L'analyse en composantes principales effectuée sur les analyses des eaux les moins minéralisées de la saison sèche 1986. Projection des points et des variables sur le plan formé par les deux axes factoriels principaux.

selon une variation nette des valeurs de l'abscisse en fonction des teneurs en orthose des feldspaths.

En conclusion, la mise en solution du sodium due à l'altération des plagioclases et celle du magnésium, régie par l'hydrolyse des ferromagnésiens, est bien rendue par le modèle de Wackerman (1982). En revanche, le modèle perd de sa pertinence pour rendre compte de l'hydrolyse des minéraux calciques et potassiques. Il est vrai que le potassium est reconnu comme un élément peu mobile, et que le calcium montre une répartition dans les laves sensiblement "homogène", des océanites aux trachytes.

V.1.3.3.5 Approche statistique.

Une analyse en composantes principales (A.C.P.) a été réalisée sur les paramètres chimiques des 56 eaux les moins minéralisées, de la saison sèche 1986.

Les résultats de l'A.C.P., sur les variables centrées réduites : Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , HCO_3^- , pH, Conductivité, sont résumés sur le diagramme (Fig.98). Il représente, en surimposition, l'espace des variables et des individus projeté dans le plan défini par les deux axes factoriels majeurs.

Du point de vue des variables

-Il apparaît que le premier facteur F1 est défini par les conductivités, le TAC, mais aussi Ca^{2+} . Cette dernière constatation nous ramène à constater "l'homogénéité" de la répartition du pôle calcique qui rentre dans la définition de F1, le facteur minéralisation.

-Les variables Na^+ et Cl^- sont indépendantes, ceci prouve, s'il en était besoin, la non influence marine sur la minéralisation des "hauts". Na^+ est plus proche du pôle minéralisation.

-Le facteur F2 est défini essentiellement par les variables Mg^{2+} et SiO_2 , dont nous avons déjà souligné l'importance pour le classement géochimique des points d'eau (Grünberger *et al*, 1988).

Du point de vue des individus

-Les facteurs F1 et F2 permettent de différencier nettement les groupes définis en § V.1.3.3.2., même si des recoupements, prévisibles, sont observés.

V.1.4 Conclusions sur la chimie des eaux éloignées de l'océan.

La minéralisation des eaux souterraines du Piton des Neiges est essentiellement issue de la mise en solution du carbone organique produit par les plantes dans le sol et de l'interaction de l'eau avec les roches. La contribution des éléments apportés par les pluies est négligeable. La mise en solution du carbone est le moteur de l'hydrolyse des minéraux silicatés, donc de la minéralisation générale.

Pendant la saison sèche les répartitions des cations majeurs sont révélatrices des formations lessivées alors que pendant la saison humide il apparaît un pôle beaucoup plus sodique qu'il est logique d'attribuer à une contribution plus importante du ruissellement superficiel qui privilégie l'hydrolyse des minéraux sodiques.

La plupart des compositions des eaux montre un équilibre vis-à-vis de la kaolinite, tandis que celles qui dénotent un équilibre vis-à-vis de la montmorillonite sont situées en zone plus sèche à des altitudes inférieures à 900 m, conformément aux observations effectuées par les pédologues.

Les variations des compositions minéralogiques introduisent des différences de minéralisation dans les eaux.

Cela est très net avec les ions Mg^{2+} et Na^+ et indiscernable avec les ions K^+ et Ca^{2+} qui semblent davantage liés à la minéralisation globale. Enfin la mise en solution de la silice est favorisée par la présence des olivines (Pédro & Delmas, 1971).

V.2 ETUDE DE L'HYDROCHIMIE DES POINTS D'EAU A PROXIMITE DE L'OCEAN

V.2.1 Généralités.

Les eaux côtières montrent l'influence de plusieurs pôles géochimiques (Tab.12, An.32,33). En effet, au pôle constitué par les laves s'ajoute l'influence marine et la présence probable de formations récifales souvent cachées par les épanchements volcaniques ultérieurs.

L'influence marine est dominante puisque la conductivité est bien exprimée par la concentration en Na^+ et en Cl^- (Fig.99). L'ordonnée à l'origine (qui représente la conductivité pour une influence marine nulle) est de $148 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ce qui est sensiblement du même ordre que la conductivité moyenne trouvée pour les eaux éloignées de l'océan ($159 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour la saison sèche, $128 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour la saison humide). L'influence marine se fait sentir sur les points d'eau jusqu'à des altitudes de 20 m environ. Les raisons invoquées pour expliquer les teneurs en Na^+ et Cl^- supérieures aux teneurs des pluies côtières sont de plusieurs types:

- d'une part, il est possible que les eaux aient été concentrées par une évaporation beaucoup plus importante sur la côte ouest (l'outil isotopique nous fournira à cet égard des informations complémentaires);

- d'autre part, des variations eustatiques de faibles amplitudes (environ 20 m) sont invoquées par (Robert,1974 ; Montaggioni,1978) pour expliquer la présence de bancs de dépôts carbonatés contenant des gastéropodes situés au-dessus du niveau marin actuel;

- la mise en place des terrains volcaniques qui s'effectue en gagnant sur la mer implique que les laves situées sous le niveau marin aient été "trempées" (comme un acier) dans l'eau marine quelle que soit la distance au rivage actuel;

- enfin, lorsque les points d'eau se situent à des faibles distances de l'océan (<100m) une contamination directe par le biseau salé est rendue possible par la faible valeur du gradient hydraulique de l'ordre de 10^{-3} (Join *et al.*, 1986).

V.2.2 Correction de l'influence marine.

En domaine côtier, la minéralisation due à la mer est dominante et "masque" l'influence des autres pôles géochimiques. Il peut donc s'avérer utile de corriger les compositions des eaux, des apports d'éléments marins pour mettre en évidence les autres pôles de minéralisation. Ainsi, une méthode très simple est employée.

Si l'on admet que la contamination se fait suivant les proportions d'une eau marine, il devient possible de calculer élément par élément l'apport marin. L'ion chlorure fournit l'indice de la contamination marine puisqu'il est absent des autres pôles géochimiques.

NOM	Tempé- ratures (°C)	Cond micro- siemens par cm	pH	+				-		PO ₄ ³⁻	NO ₃	SO ₄	Cl	F	SiO ₂	Sal- inité (total)
				Na	K	Ca	Mg	HCO ₃	CO ₃							
.....milligrammes par litre.....milligrammes par litre.....																
5X05	22,5	438	6,91	49,0	4,0	21,4	11,6	140,3	0,0	0,0	0,2	17,7	39,1	0,3	53,0	336
BOUC9	26,3	794	7,39	41,5	2,7	39,5	42,3	359,9	0,0	1,0	23,9	7,5	23,1	0,3	80,0	621
CHCAR	23,1	728	9,00	141,0	8,0	9,6	1,7	335,5	13,5	0,2	0,0	0,0	33,7	7,2	550	
CM18	22,5	1122	7,39	125,0	6,4	26,4	23,3	286,7	0,0	0,4	11,7	29,0	204,1	50,0	763	
CM52	22,7	1807	7,15	220,0	11,3	21,2	26,0	88,5	0,0	0,5	8,8	45,6	339,0	0,4	37,0	798
COLIM	20,5	874	7,63	92,0	6,6	17,6	19,0	61,0	0,0	0,6	3,3	24,4	161,5	0,2	35,0	421
CM9	23,4	1377	7,25	162,0	9,0	32,6	29,3	122,0	0,0	0,4	5,9	40,7	259,2	0,3	53,0	714
ES20	23,2	4322	7,47	386,0	21,7	98,5	145,0	302,0	0,0	0,0	21,6	145,0	888,0	40,0	2048	
ES19	20,3	3270	7,80	380,0	28,3	62,0	94,0	710,7	0,0	5,5	12,5	127,0	427,0	39,4	1886	
ES29	25,5	712	7,36	43,0	7,8	21,2	40,0	277,6	0,0	0,0	1,7	0,0	71,0	0,2	8,6	471
ES 32	24,2	895	7,25	35,0	5,7	29,7	50,0	158,6	0,0	0,4	99,7	25,9	72,8	0,2	43,6	521
ES36	21,4	890	7,15	87,0	8,2	24,3	28,1	134,2	0,0	1,6	5,4	23,0	115,0	0,2	34,0	461
ES36V	24,1	1418	8,20	97,5	13,7	49,0	74,1	472,8	3,0	0,0	0,0	9,3	137,0	0,2	44,6	901
FUM	24,6	1590	7,01	175,0	10,0	32,5	39,0	143,4	0,0	1,2	16,0	56,1	294,7	0,3	59,0	827
GRRAV	19,2	568	7,40	54,5	5,1	17,0	10,9	48,8	0,0	0,8	2,6	16,4	124,0	35,6	316	
PORT52	24,6	280	6,60	17,0	2,9	26,0	3,6	119,0	0,0	0,3	1,8	23,0	7,0	0,3	34,0	235
PORT F5	23,3	2530	6,79	304,0	16,3	39,5	55,0	134,2	0,0	0,5	10,3	67,0	522,0	0,2	44,0	1193
POSS36	23,3	424	7,09	28,0	3,5	18,2	12,4	149,5	0,0	1,1	10,3	14,0	27,0	52,0	316	
POSSP35	23	553	6,62	12,0	0,8	29,5	38,5	280,6	0,0	0,6	0,9	16,0	12,0	0,1	49,0	440
SC3	20,7	3506	7,74	447,5	21,3	44,8	67,0	76,3	0,0	0,4	5,8	115,4	834,3	39,0	1652	
SG15	24,4	839	8,17	150,0	3,4	18,4	4,5	314,2	0,0	0,5	9,3	56,0	213,0	26,0	795	
SG18	23,7	509	7,71	56,5	7,2	13,8	6,4	51,9	0,0	0,3	0,2	31,4	69,2	0,3	10,0	247
SG19	24,1	748	7,40	49,5	3,2	55,0	15,2	247,1	0,0	0,6	11,9	18,5	49,7	0,6	51,0	502
SG20	23,8	5100	8,16	880,0	56,0	14,1	11,0	1201,7	0,0	1,0	1,0	166,7	656,8	31,0	3019	
SG4	24,1	501	6,88	49,5	6,4	13,0	11,9	128,1	0,0	0,7	22,4	16,0	26,6	0,3	75,0	350
SG43	21,9	1030	7,76	115,0	5,8	32,6	22,5	94,6	0,0	0,4	9,6	25,8	182,8	0,2	47,0	536
SG56	31,3	686	7,41	70,5	4,1	16,6	12,5	100,7	0,0	2,6	9,5	16,3	99,4	45,0	377	
SG6N	23,8	534	7,76	102,0	5,0	9,8	6,7	122,0	0,0	0,2	0,0	14,0	114,0	4,8	5,0	379
SG6R	22,2	482	7,30	46,5	7,6	16,6	7,1	137,3	0,0	0,2	2,5	9,6	23,6	0,3	18,0	269
SGP12	24,3	3907	7,41	472,5	65,8	69,0	90,0	533,8	0,0	0,2	13,3	129,6	585,8	1,2	34,0	1994
SGP14	23,2	1651	7,57	192,0	15,2	21,6	30,5	109,8	0,0	0,6	19,4	45,5	298,2	0,2	57,0	790
SGP15	24,9	2482	7,58	270,0	20,1	79,0	57,0	390,4	0,0	0,3	9,8	107,9	372,8	1,3	36,0	1343
SL38	19,6	2910	7,84	478,0	30,0	36,0	55,0	85,4	0,0	0,1	9,0	160,0	994,0	0,4	2,0	1850
SL41B	19,1	902	7,40	120,0	7,5	24,3	22,9	54,9	0,0	0,5	2,7	42,0	319,0	0,4	35,0	629
SL5	19,8	1022	6,86	175,0	1,1	19,9	20,0	42,7	0,0	1,4	3,1	46,5	310,6	0,1	29,2	650
SP1	20,9	413	7,41	38,0	3,5	11,6	8,2	88,5	0,0	0,8	9,8	19,0	46,0	0,2	46,0	271
SP2	20,1	189	6,74	17,7	2,6	9,6	5,3	64,1	0,0	0,3	6,6	6,8	35,5	0,1	41,0	190
SP29A	23,6	246	7,65	22,3	1,7	20,0	11,1	122,0	0,0	0,6	15,4	7,1	17,7	0,2	56,0	274
SP29B	21,6	242	7,71	20,0	1,7	15,7	11,0	109,8	0,0	0,7	16,8	7,1	21,3	0,4	55,0	259
SP3	19,9	263	7,19	21,0	2,5	9,2	3,6	64,1	0,0	0,5	2,9	6,0	23,0	0,1	42,0	175
SP30	21,7	226	6,76	22,2	6,5	14,8	7,8	103,7	0,0	0,0	8,6	3,0	18,8	0,1	54,0	239
SP3A	20,1	252	6,41	20,0	3,0	9,0	4,7	67,1	0,0	0,5	3,4	4,8	25,0	0,1	40,0	178
SP6	18,3	181	6,40	12,0	2,9	11,1	2,0	45,8	0,0	0,3	2,4	2,4	16,0	0,1	30,0	125
SP7	18	387	7,40	35,0	3,3	8,7	6,4	45,8	0,0	0,5	3,0	23,0	59,0	34,0	219	
SP8	19,5	1826	6,96	219,0	12,9	74,0	2,0	94,6	0,0	0,5	12,0	55,0	362,0	0,2	40,0	872
SPBA	20,6	195	6,57	13,0	5,0	13,8	8,1	85,4	0,0	0,4	10,1	3,3	14,8	50,0	204	
SPDA	20,1	99	6,38	6,7	2,0	12,0	1,8	51,9	0,0	0,2	2,7	0,0	6,6	0,1	36,0	120
SPPHI	20,7	173	7,54	11,2	1,6	14,9	7,1	85,4	0,0	0,2	7,7	2,4	10,6	0,1	52,0	193
SSTLEU	23,9	479	7,69	40,0	1,5	13,6	14,5	167,8	0,0	0,0	14,1	10,7	3,0	0,2	49,8	315
RESTA	23,1	69	7,31	4,9	1,0	9,8	1,5	36,6	0,0	0,5	1,0	1,5	7,1	0,2	25,0	89
SMAR	19,9	108	7,19	6,0	1,8	9,8	1,8	42,7	0,0	0,3	2,9	4,5	5,0	0,1	24,0	99
STOINET	20,9	81	7,19	5,6	1,0	10,0	3,1	42,7	0,0	0,5	3,0	1,3	7,1	0,1	22,0	96

Tab.12: Résultats des analyses partielles des eaux proches de l'océan pendant la saison sèche 1986 (milligrammes par litre).

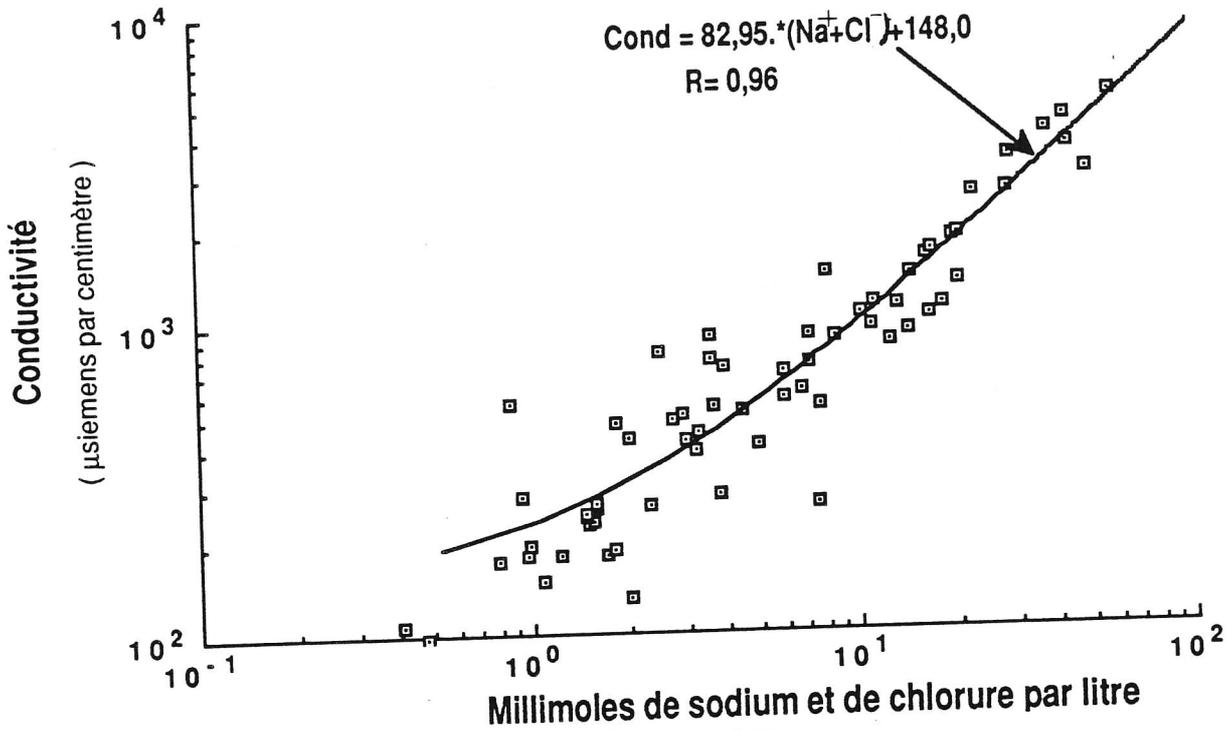


Fig .99: Conductivité vs ($Na+Cl^-$) sur les eaux côtières

Les concentrations en ions sodium et chlorure expriment bien l'influence marine, qui détermine la minéralisation générale. L'ordonnée à l'origine représente la conductivité des eaux pour une influence marine nulle. La relation est transcrite sous sa forme arithmétique.

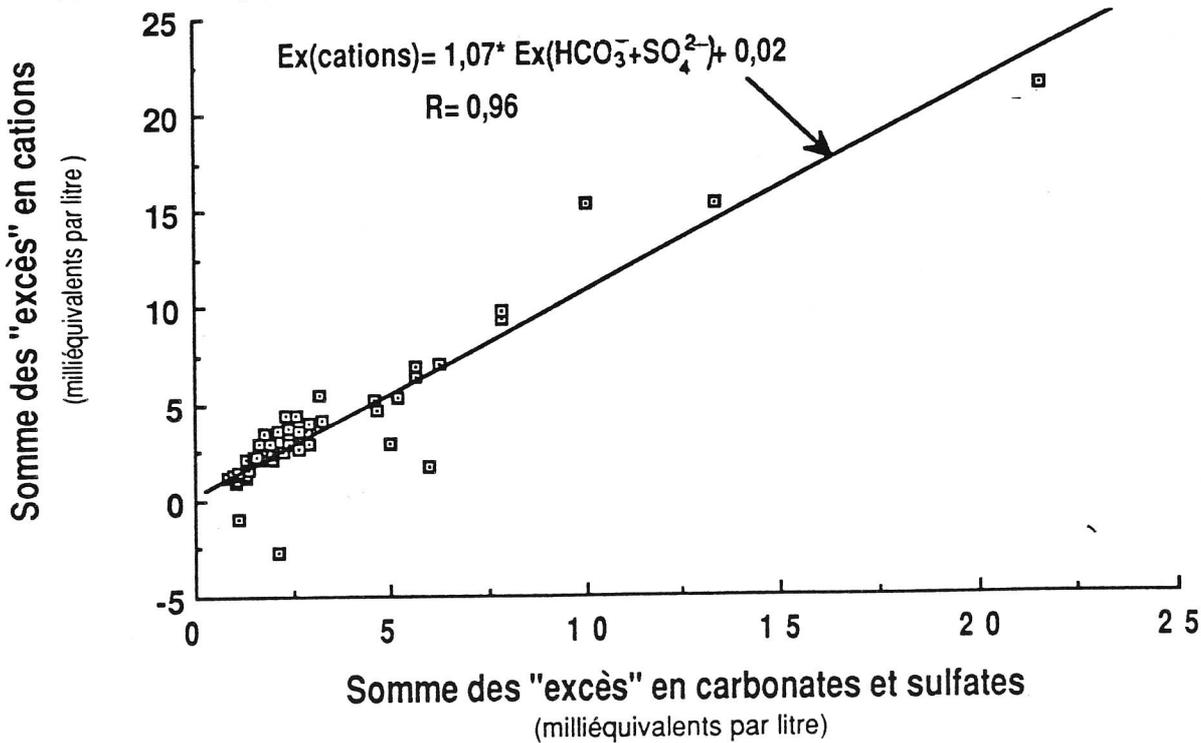


Fig.100: Relation entre les "excès" en cations et les "excès" en carbonates et sulfates vis-à-vis de l'influence marine. Lorsque l'on corrige l'influence marine, il apparaît un pôle de minéralisation carbonaté et sulfaté.

le calcul se fait de la manière suivante :

soit $[Cl^-]_{mer}$ la teneur en ions chlorures d'une eau marine,
 soit $[Cl^-]_{eau}$ la teneur en ions chlorures de l'eau considérée,
 soit $[Me^{\pm}]_{mer}$ la teneur en ions Me d'une eau marine,
 soit $[Me^{\pm}]_{eau}$ la teneur en ions Me de l'eau considérée,
 Soit $[Me^{\pm}]_{apports}$ la teneur en ions Me apportés par la mer.

l'apport d'ions Me^{\pm} dû à l'influence marine est estimé par:

$$\frac{[Cl^-]_{eau} \cdot [Me^{\pm}]_{mer}}{[Cl^-]_{mer}} = [Me^{\pm}]_{apports}$$

Il est choisi d'appeler excès en Me^{\pm} ($E[Me^{\pm}]$) la quantité :

$$E[Me^{\pm}] = [Me^{\pm}]_{eau} - [Me^{\pm}]_{apports}$$

Le calcul est effectué en se servant de la composition moyenne d'une eau de mer (Rodier, 1984) pour les ions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} . Le calcul n'est pas nécessaire pour HCO_3^- et SiO_2 du fait des faibles teneurs marines ces teneurs sont directement assimilables à des "excès". Les valeurs calculées sont rarement négatives et une relation significative apparaît entre la somme des "excès" en Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , et la somme des "excès" en HCO_3^- et SO_4^{2-} , (en $meq.l^{-1}$) (Fig.100). Masqué par l'influence marine, apparaît donc un pôle de minéralisation secondaire carbonaté et sulfaté. Si la correction est valide lorsque l'on considère la somme des excès des cations il n'en est pas de même pour les éléments pris un à un. La cause peut être trouvée dans les échanges cationiques causés par les argiles (Stumm & Morgan, 1981), ou bien dans les barrières géochimiques que constituent les saturations en certains minéraux. L'étude isotopique de la fraction carbonatée et sulfatée peut apporter des indications supplémentaires sur l'origine de ce pôle côtier de minéralisation.

CHAPITRE SIXIEME

ETUDE ISOTOPIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

RAPPEL DU SOMMAIRE DU CHAP VI: ETUDE ISOTOPIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

Introduction	p.149
VI.1 Etude des isotopes constitutifs	p.151
VI.1.1 Validité du traçage isotopique	p.151
VI.1.2 Variations temporelles des teneurs en ^{18}O	p.152
VI.I.2.1 Les variations saisonnières	p.152
VI.I.2.2 Les réactions à Clotilda	p.152
VI.1.3 Les altitudes d'alimentation	p.154
VI.1.3.1 Généralités	p.154
VI.1.3.2 Calcul des altitudes	p.156
VI.1.3.3 Applications à la côte ouest	p.156
VI.2 Etude de la minéralisation carbonnée à l'aide du ^{13}C	p.158
VI.2.1 Généralités	p.158
VI.2.2 Effet isotopique de la mise en solution	p.159
VI.2.3 Présence des différents réservoirs à la Réunion	p.160
VI.2.3.1 Le CO_2 biogénique	p.161
VI.2.3.2 Le CO_2 périvolcanique	p.161
VI.2.3.3 les carbonates marins	p.161
VI.2.4 Résultats des analyses des précipités	p.163
VI.2.5 Conclusion	p.164
VI.3 Etude de la minéralisation carbonnée à l'aide du ^{14}C	p.167
VI.3.1 Généralités	p.167
VI.3.2 Etude du couple ^{13}C - ^{14}C	p.168
VI.3.3 Conclusion sur la minéralisation carbonatée	p.170
VI.4 Etude isotopique de la minéralisation sulfatée	p.171
VI.4.1 Généralités	p.171
VI.4.2 Etude des sulfates dissous dans les eaux réunionnaises	p.174
VI.4.3 Corrélations avec les paramètres chimiques	p.176
VI.5 Conclusions sur l'étude isotopique	p.178

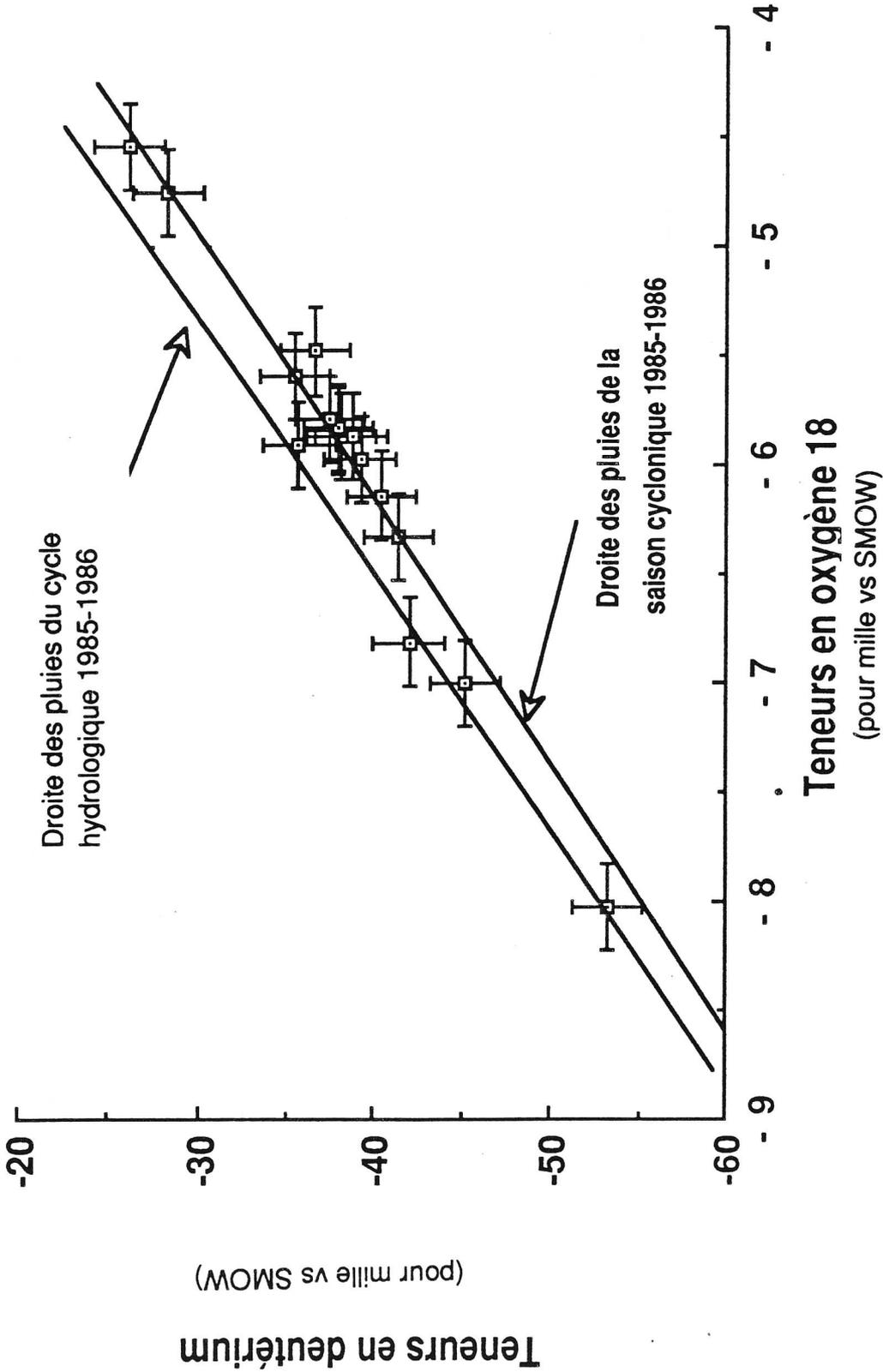


Fig.101: Relation entre teneurs en oxygène 18 et deutérium dans les eaux souterraines échantillonnées à la fin de la saison sèche. Les points sont majoritairement très proches de la droite définie pour les pluies de la saison cyclonique 1985-1986. Il n'y a donc pas d'effet sensible d'évaporation, ou d'échange isotopique. Le "traçage" à la condensation est donc valide.

INTRODUCTION

L'étude des teneurs isotopiques des eaux souterraines a pour objectif de préciser les connaissances sur la minéralisation et la circulation au sein des aquifères, avec une attention particulière portée à la côte ouest.

VI.1 ETUDE DES ISOTOPES CONSTITUTIFS DES EAUX SOUTERRAINES.

VI.1.1 La validité du traçage isotopique.

Du fait des variations importantes des teneurs en ^{18}O et en ^2H observées dans les pluies et dans les eaux des sols aussi bien spatialement que temporellement, il est logique de relier ces variations aux caractéristiques isotopiques des eaux souterraines. Le préliminaire à cette démarche est de vérifier que les teneurs isotopiques des eaux n'ont subi aucune modification entre l'alimentation (par les pluies) et le prélèvement aux émergences. Les phénomènes en cause sont:

- l'évaporation qui pourrait enrichir les eaux en isotopes lourds(cf. chap III et IV),
- l'échange isotopique avec la roche, observé dans certaines situations géothermales (cf.Fontes , 1976),

- l'échange isotopique avec le CO_2 gazeux volcanique, comme dans les "mofettes" de Toscane (cf.Fontes, 1976).

Toutes ces modifications se traduisent par une modification relative des teneurs en ^{18}O par rapport aux teneurs en ^2H .

Sur un diagramme, (fig.101) sont représentés les couples de teneurs en ^{18}O et en ^2H des eaux souterraines prélevées à la fin de la saison sèche 1986 (An.34). Il apparaît très nettement que les points ne sont jamais éloignés de la droite annuelle, bien que plus proches de la droite définie par les pluies de la saison cyclonique 1985-1986.

Deux conclusions peuvent être tirées de ce diagramme :

- d'une part, l'eau présente aux émergences provient majoritairement infiltrations **des pluies de la saison cyclonique**,

- d'autre part, aucune modification perceptible, même sur les thermes de Cilaos, n'est détectée ; le traçage isotopique en ^{18}O est donc conservé les eaux s'étant **infiltrées sans évaporation préliminaire**.

VI.1.2 Variations temporelles des teneurs en ^{18}O dans les eaux souterraines.

VI.1.2.1 Variations saisonnières.

Sur les 17 points mesurés (Tab.13) en février 1985 et en octobre 1986, 12 ne présentent pas de variations sensibles des teneurs, 5 présentent des variations inverses de celles que l'on s'attendait à observer (appauvrissement en saison sèche).

Il est donc probable que:

- la pluie de la saison sèche ne s'infiltré pas significativement dans la plupart des cas comme on le pressentait à l'issue de l'étude des sols (cf. § IV) et de la relation ^{18}O vs ^2H (cf. § VI.1.1) ;

- lorsqu'il se produit des variations saisonnières, elles ne se répercutent qu'avec un décalage apparent de 6 mois.

Cette réflexion est en accord avec bon nombre d'observations qui suggèrent que les aquifères réagissent aux fortes périodes pluvieuses avec un temps de latence supérieur à 6 mois (Atlas hydrogéologique de la Réunion, 1987).

VI.1.2.2 Réactions à la perturbation cyclonique Clotilda.

Nous avons souligné l'importance du signal isotopique (cf. §III.2) délivré par les pluies de la perturbation cyclonique Clotilda, il est donc logique de rechercher dans les aquifères si le reflet de "l'appauvrissement" en ^{18}O est déjà sensible, 6 mois plus tard, aux émergences de bas de pente.

Sur les 28 échantillons prélevés et analysés (Tab.13) à la fin de la saison sèche suivant Clotilda, dix présentent des teneurs montrant un appauvrissement remarquable, par rapport à la saison sèche précédente et/ou par rapport à la saison cyclonique 1985-1986, pour ces dix points d'eau on peut supposer un temps de transit apparent de moins de huit mois; parmi les 18 ne présentant pas d'appauvrissement, cinq montrent un enrichissement net qui peut être le fait, d'une alimentation en saison sèche, soit un temps de transit très court, inférieur à 3 mois. Les autres sont probablement le fait de temps de transit supérieurs à 8 mois.

NOM	SECTEUR	FEV. 1986	OCT. 1986	OCT. 1987	%	VARIATIONS SAISONNIERES	%	SENSIBILITE	ALTITUDES D'ALIMENTATION		reconnaissance des pluies	Temps de transit apparent (mois)	altitude d'infil. probable (mètres)
									1985-1986	1986				à Cloitida	commentaires	gradient de la saison cyclonique	gradient de la saison sèche
THEMES	CILAOS	-8,03	-8,03	-9,17	0 non		-13	oui	2530	2530	3338	< à 6	2500
RES STANNE	EST	-4,05	-4,29	-4,46	-6 faibles		-4	non	470	690	840	< à 6	1100
MARVILLE	EST	-4,59							960			< à 6	960
GRAND ETANG	EST	-4,12							533			< à 6	2200
MILEMONT	EST	-3,12	-3,68		-16 faibles, inverses			probable	<h	<h	2600	3< <6	1000
TAKAMAKA	EST			-6,40								< à 6	1500
ESS2	ETANG SALE		-5,56	-6,24				-12 probable	550	850	2310	< à 6	1000
PEREFOND	ETANG SALE			-5,08				improbable	329		1980	< à 3	1980
ESS6	ETANG SALE		-6,46						950			< à 3	1100
TEV 34	LE TEVELAVE		-5,91	-5,74				3 non	700	630	2560	< à 3	2400
POSS68	POSSESSION	-4,57	-4,75		-4 non				310	490	1610	< à 6	500
POSS36	POSSESSION	-6,39	-6,93		-8 faibles, inverses				2090	2622	2900	de 6	2090
DEZ13	POSSESSION	-5,64							1360		2370	< à 6	1360
POSS35	POSSESSION	-5,05							780		1950	< à 6	780
SANS SOUCIS	POSSESSION			-6,65				probable		2350	3084	< à 6	2200
RAY MAUHEUF	POSSESSION			-4,44				improbable		186	1520	< à 3	1520
DUCLOS	POSSESSION			-5,78				improbable		1500	2470	< à 6	1500
LATANIERS	POSSESSION			-5,60				improbable		1320	2340	< à 6	1320
PORT 52	POSSESSION		-7,77						3440			< à 6	1000
SAL2	SALAZIE	-4,80	-5,14	-6,20	-7 faibles, inverses				850	910	1100	< à 6	1500
CHCARROSSE	ST GILLES	-6,20	-6,14	-7,13	1 non			-15 oui	1200	1160	1890	< à 6	1200
SG19	ST GILLES	-5,55	-5,84		-5 faibles, inverses				730	950	2306	< à 6	800
SG43	ST GILLES	-5,54	-5,59		-1 non				720	760	2300	< à 6	740
SG5	ST GILLES	-5,97							1040		2600	< à 6	1040
BC9	ST GILLES	-6,20	-6,11		-2 non			1 non	1200	1150	2770	< à 6	1200
FUM	ST GILLES	-5,74	-5,87		0 non				870	964	2440	< à 6	910
TROU DEAU	ST GILLES	-5,48	-5,48	-6,48	0 non			-17 oui	680	680	1410	< à 6	680
RAV ST GILLE	ST GILLES	-6,06	-8,22		-30 fortes, inverses				1100	2680	2400	< à 6	1100
SG18	ST GILLES	-5,83	-5,67	-9,67	3 non			-52 oui	940	820	3742	> à 6	880
CM52	ST GILLES	-6,39	-5,85		3 non			9 non	1480	1350	950	< à 6	1480
SG26	ST GILLES	-5,27	-5,76					9 faible?	530	880	1610	< à 6	705
KAUFMANT	ST GILLES		-5,76					improbable		880	2100	< à 6	880
SG56	ST GILLES		-7,70	-5,48				34 non	2300	680	4040	< à 6	2300
BASSIN PREGO	ST GILLES			-4,42				improbable		<0		< à 3	760
SL38	ST LEU	-6,81							1180		3150	< à 3	1180
S ST LEU	ST LEU	-4,54	-4,08					11 non	90	<0	880	< à 3	650
GRANDE RAV	ST LEU	-7,70	-8,40					-9 probable	1600	1935	4040	< à 6	1600
SL41B	ST LEU	-8,07	-6,37						1780	970	4410	< à 6	1780
SP6	ST PAUL	-6,94	-7,00	-6,31	-1 non			10 non	1780	1830	1370	3< <6	1800
SP3	ST PAUL	-6,66	-6,33	-8,03	5 faibles, inverses			-24 oui	1600	1380	2512	< à 6	1490
SP7H	ST PAUL	-5,73	-5,83		-2 non				980	1050	3000	< à 6	1000
SP8	ST PAUL	-5,73	-5,79		-1 non				980	1023	2070	< à 6	1000
SP2	ST PAUL	-6,02	-8,98	-8,18	-39 fortes, inverses			9 non	1180	3143	2612	< à 6	2400
ST PAUL 29B	ST PAUL	-6,52	-6,40					2 non	1510	1430	2860	< à 6	1510
GRANDE FONT	ST PAUL	-7,50	-4,90					42 non	2160	432	3840	3< <6	2160
SP7	ST PAUL	-7,42							2100		3760	< à 6	2100
SP3A	ST PAUL	-8,03							2500		4370	< à 6	2500

Tab.13: Teneurs en ¹⁸O des eaux souterraines lors des trois campagnes de prélèvements et interprétation des variations en termes de temps de transit et d'altitudes moyennes d'alimentation

VI.1.3 Les altitudes d'alimentation.

VI.1.3.1 Généralités.

Du fait des gradients altitudinaux de teneurs en ^{18}O observés dans les pluies (§III.2) lors des saisons non affectées par une forte dépression cyclonique, il est possible d'estimer les altitudes moyennes d'infiltration, (Fontes *et al*, 1967) aussi bien en saison cyclonique qu'en saison sèche. Toutefois à la Réunion, ces estimations sont souvent largement frappées d'incertitude et doivent être prises avec beaucoup de précautions.

En effet, si l'on admet que l'erreur analytique est de 0,2 ‰ SMOW, l'imprécision de l'estimation est de l'ordre de deux cent mètres, avec un gradient de $-0,1 \text{ ‰} \cdot 100\text{m}^{-1}$. De plus, ces calculs ne sont strictement valides que sous certaines conditions :

- les gradients altimétriques sont supposés constants d'une année sur l'autre ce qui est faux, au moins lors du passage des perturbations tropicales.

- les eaux aux émergences ne sont pas un mélange entre les pluies de la saison sèche et les pluies de la saison humide.

VI.1.3.2 Calcul des altitudes.

En raison de la variation spatiale des gradients altitudinaux de teneurs en isotopes stables, (Cf §.III.2) des gradients locaux sont estimés par les stations de mesures les plus proches et ceci par secteurs (deuxième colonne du tableau 13). Le calcul est effectué pour les gradients de la saison cyclonique 1985-1986 et pour les gradients de la saison sèche 1986. Comme les teneurs des pluies de la saison cyclonique 1986-1987 ne présentent pas de variations altitudinales prononcées, elles ne peuvent pas être prises en compte dans le calcul alors qu'elles participent à la recharge. Le calcul (Tab.13) montre des altitudes très variées, les unes compatibles avec les situations des bassins versants, les autres non.

Une altitude d'alimentation "déraisonnable" (en italique dans le Tab.13), inférieure à celle du point d'eau ou supérieure à celle du sommet du bassin versant possible, permet la reconnaissance de l'eau d'émergence comme étant plus probablement issue de l'une ou de l'autre saison (cf. colonnes "reconnaissance des pluies" (Tab.13)), voire de l'appauvrissement en isotopes lourds dû à la perturbation tropicale Clotilda.

Les points d'eau qui ne présentent pas de variations saisonnières et qui montrent des altitudes d'alimentation inférieures à 1500 m (avec les gradients de la saison humide) sont très vite apparus comme ne bénéficiant pas d'infiltration pendant la saison sèche (comme nous l'avons montré dans le profil "Trois Bassins" (cf. §IV.3)). Il s'agit surtout des points d'eau du secteur de S' Gilles. La synthèse des renseignements tirés des variations de teneurs et des altitudes calculées avec les deux gradients, permet de proposer:

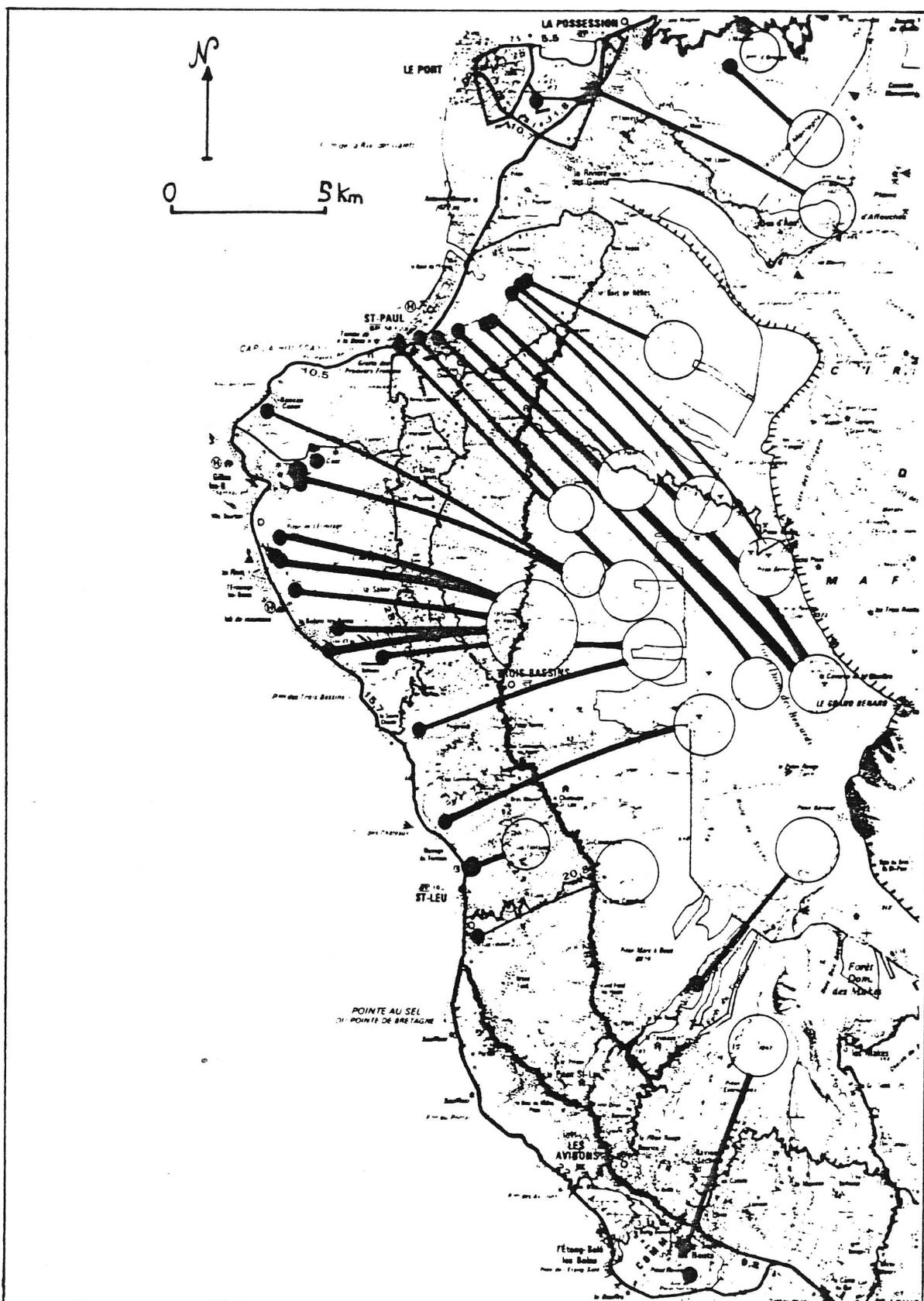


Fig.102: Applications du principe des altitudes d'alimentation aux eaux souterraines de la côte ouest. Les cercles indiquent les zones probables de recharge, les points désignent les émergences. Certaines sources de l'étang de St Paul montrent des altitudes probables d'alimentation, supérieures au sommet de leur bassin versant hydrologique apparent. Cette situation nous amène à situer leur bassin versant hydrogéologique plus au sud sur les flancs du Piton benard.

- d'une part une altitude d'infiltration probable (dernière colonne (Tab.13))

-d'autre part un temps de transit **apparent** qui doit être pris avec énormément de précautions ; l'échantillonnage saisonnier pouvant être trompeur vis-à-vis de systèmes qui pourraient être, soit très rapides, ou extrêmement lents.

VI.1.3.3 Applications à la côte ouest.

Les points d'eau figurés (Fig.102) sont reliés par des flèches à leurs zones respectives probables d'infiltration en tenant compte de la pente, reflet du sens de coulées des laves de la phase IV (cf. §I), et des altitudes d'infiltration les plus probables définies plus haut.

Les trajets peuvent suivre la pente dans la plupart des cas, sauf pour certains points d'eau du secteur de S^t Paul où les altitudes d'alimentation semblent supérieures au sommet du bassin versant hydrologique apparent et doivent être placées beaucoup plus au Sud sur les versants du Piton Benard.

Les points d'eau du secteur de S^t Gilles montrent des altitudes d'alimentation cohérentes avec la pente mais, dans la plupart des cas inférieures au "barycentre" de collecte des pluies qui se situerait à une altitude supérieure à 1500 m. Il y aurait donc "capture" des infiltrations de haut de pente au profit de l'alimentation du secteur de S^t Paul et aux dépens du secteur de S^t Gilles, si l'on excepte le point d'eau Rav. S^t Gilles, manifestement alimenté par la ravine qui porte son nom. Cette disposition un peu particulière est à mettre en relation :

-avec la fissure éruptive de S^t Gilles qui détourne probablement le trajet des eaux ,

-avec une direction structurale (Fig. 103) qui correspond à la direction des ravines proches de l'extrémité sud de l'Etang de S^t Paul (par exemple la ravine Bernica) et à la direction générale des remparts ouest des cirques de Cilaos et de Mafate.

Enfin la plupart des points d'eau présente des altitudes moyennes d'alimentation supérieures à 800-900 m qui sont les altitudes maximales de monoculture de la canne à sucre. La plupart des eaux correspond donc à des eaux infiltrées, au moins en partie dans un sol à végétation forestière.

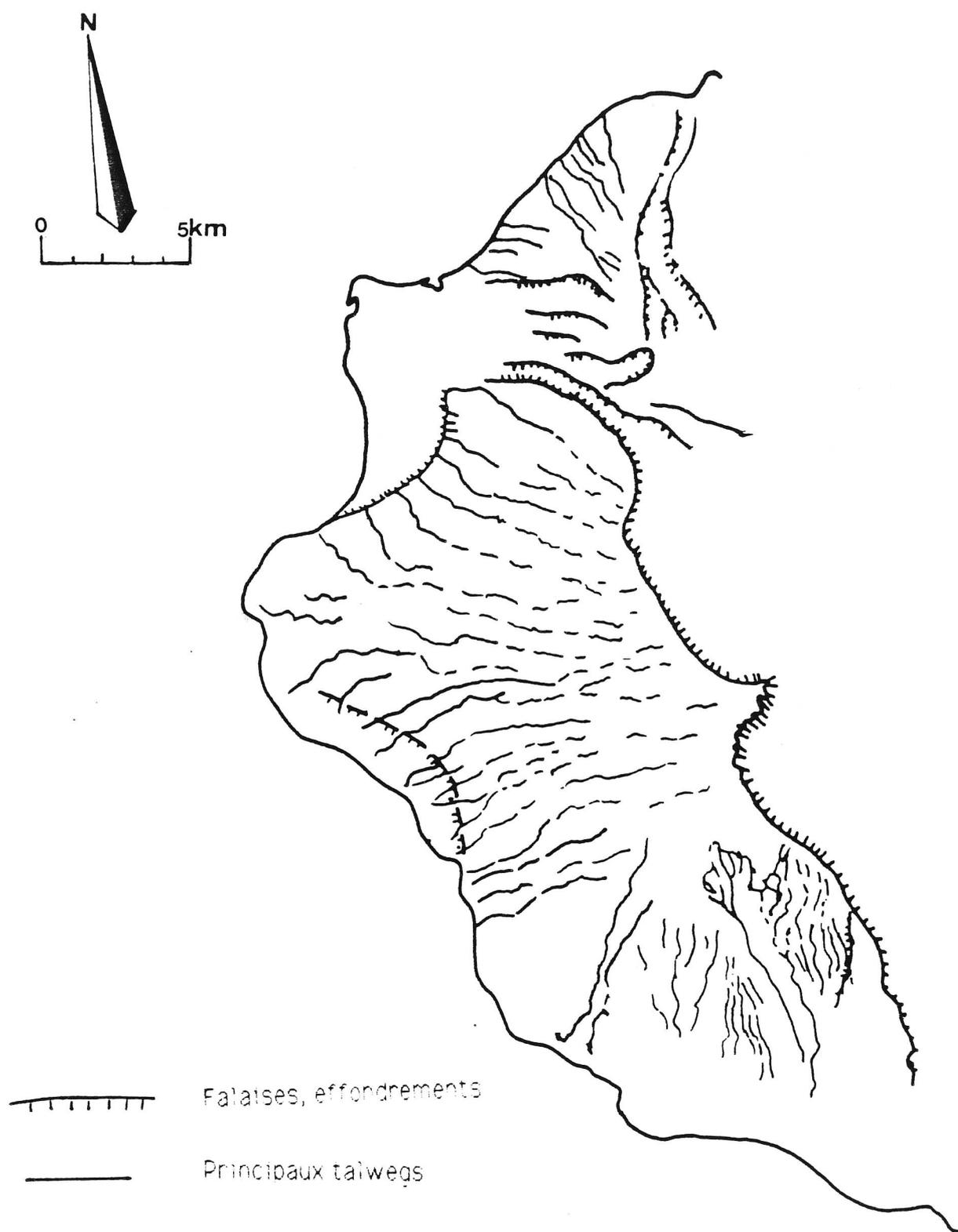


Fig.103: Principaux indices des structures sur la côte ouest, ravines, remparts, falaises actuelles et passées. D'après une photo Landsat (Atlas hydrogéologique, 1986). La carte montre une direction N110 marquée par la direction générale des remparts de Cilaos et de Salazie et par les ravines du sud de l'étang de S^t Paul.

VI.2 ETUDE ISOTOPIQUE DE LA MINERALISATION CARBONÉE A L'AIDE DU ^{13}C .

VI.2.1 Généralités.

La teneur en ^{13}C du carbone inorganique total dissous (CITD) des eaux est utilisée en appoint des méthodes chimiques pour étudier la participation de différents réservoirs naturels à la minéralisation carbonatée des eaux.

Les réservoirs naturels de carbone sont, le CO_2 atmosphérique, le CO_2 biogénique, le CO_2 périvolcanique, les carbonates marins.

Le CO_2 atmosphérique (dans le cas d'une atmosphère non polluée) a une teneur moyenne en ^{13}C de $-6,8 \text{ ‰}$ vs PDB (Keeling, 1961).

Le CO_2 biogénique est produit par les plantes lors de la respiration et par l'oxydation de la matière organique. Il est généralement observé un enrichissement en ^{13}C du CO_2 produit, de 2 à 5 ‰ par rapport aux teneurs en ^{13}C de la végétation dont il est issu (Dörr & München, 1979; Rightmire, 1978; Dever, 1985). Or les teneurs en ^{13}C des plantes varient suivant le cycle photosynthétique auquel elles sont soumises (Bender, 1971).

Les plantes qui suivent le cycle de Calvin et Benson cycle à trois atomes de carbone (ou cycle en C3) présentent des teneurs en ^{13}C comprises entre -22 et -33 ‰ vs PDB. Ce sont les espèces sylvestres, la plupart des dicotylédones et certaines monocotylédones, le riz, le blé, le seigle, etc.

Les plantes qui suivent le cycle de Hatch et Slack (cycle à quatre atomes de carbone (C4)), présentent des teneurs entre -10 et -20 ‰ vs PDB, il s'agit de certaines monocotylédones, la canne à sucre, le sorgho, le mil, le maïs et les Cypéracées, ce type de plante prospère en milieu équatorial.

Les plantes Crassulentes qui suivent un cycle mixte, le C.A.M., (Crassulacean Acid Metabolism) ont des teneurs proches de -17 ‰ vs PDB.

Le CO_2 périvolcanique montre généralement des teneurs en ^{13}C comprises entre $1,7$ et $-6,8 \text{ ‰}$ vs PDB (Allard, 1978; in Nicolini, 1980; Giggenbach *et al*, 1983).

Les carbonates marins présentent généralement des teneurs proches de l'étalon et une mesure effectuée par Eberschweiler (1986) donne pour le récif actuel de Mayotte une teneur en ^{13}C de $-1,92 \text{ ‰}$ vs PDB.

VI.2.2 Effet isotopique de la mise en solution du carbone.

La mise en solution du carbone se produit selon les équations définissant le système calco-carbonique, présentées au chapitre IV (Cf. §IV.1.2.). Les facteurs de fractionnement isotopique affectant ^{13}C lors de ces réactions sont connus et sont thermodépendants. Leur thermodépendance peut s'exprimer par une relation du type :

$$\epsilon \text{ ‰} = A + B/T$$

$\epsilon \text{ ‰}_{(1-2)}$ facteur de fractionnement exprimant l'enrichissement isotopique du composé 1 par rapport au composé 2 (lors de la réaction à l'équilibre de 1 vers 2),

T est la température en kelvin,

A et B des coefficients relatifs à la réaction.

réactions	A	B	$\epsilon \text{ ‰}$	$\epsilon \text{ ‰}$	
			25°C	5°C	
$\text{CO}_{2(\text{g})} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$	-00,19	+373	+1,06	+01,15	(Mook <i>et al.</i> , 1974)
$\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$	+24,12	-9866	-8,99	-11,37	(Mook, 1979 <i>in</i> Dever, 1985)
$\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-}$	-01,63	+604	+0,39	+00,54	(Mook, 1979 <i>in</i> Dever, 1985)
$\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3$	+15,10	-4232	+0,90	-00,12	(Mook, 1980)

Remarque: il est possible de combiner ces expressions pour calculer l'enrichissement approximatif à l'équilibre entre deux espèces quelconques. Par exemple :

$$\epsilon \text{ ‰}(\text{CO}_{2(\text{g})} \rightleftharpoons \text{CaCO}_3) = \epsilon \text{ ‰}(\text{CO}_{2(\text{g})} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3) + \epsilon \text{ ‰}(\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-) + \epsilon \text{ ‰}(\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3).$$

La teneur en ^{13}C du carbone inorganique total dissous (CITD) va donc dépendre :

- de la répartition des espèces carbonatées,
- de la teneur de la source de carbone extérieure à la solution.

Mais les facteurs de fractionnement sont donnés pour l'équilibre thermodynamique et ils n'interviennent plus lorsque les réactions sont totales. Cette considération nous amène à distinguer deux cas de figure pour la mise en solution du CO_2 biogénique dans les sols.

Lorsque le flux de production de CO_2 biogénique est largement supérieur au flux du CITD au sein de la phase aqueuse, le fractionnement est maximum et s'approche de sa valeur théorique. Le volume de CO_2 est estimé infini devant le prélèvement effectué par la solution drainante, c'est le cas du système ouvert sur la phase gazeuse (Fontes, 1983, 1985).

Lorsque le flux de production de CO_2 biogénique est faible devant le flux de drainage du CITD,

tout le CO₂ produit est absorbé par la solution drainante le fractionnement est moindre (Akita, 1980 ; Fontes, 1983, 1985). Ces deux cas sont le reflet des conditions du drainage (production végétale plus ou moins forte du sol, infiltration plus ou moins rapide, porosité plus ou moins grande) mais aussi des conditions chimiques (pH, force ionique des solutions). En effet le pH de l'eau dans les sols conditionne la mise en solution du CO_{2(g)} mais il peut être influencé par la présence plus ou moins affirmée d'acides organiques, et par l'hydrolyse des minéraux silicatés qui peut maintenir le pH vers de fortes valeurs (Fontes, 1978).

Lorsque l'on estime être dans le premier cas de figure, il est possible de calculer la teneur en ¹³C du CO_{2(g)} équilibrant. C'est à dire que l'on calcule le facteur de fractionnement entre le CO_{2(g)} et le CITD de la solution avec les hypothèses suivantes:

-équilibre de la solution avec un réservoir de CO₂ gazeux à teneur constante en ¹³C et à pression partielle constante;

- le pH est entièrement déterminé par le système calco-carbonique ;
- la solution est diluée et les coefficients d'activité sont proches de 1 ;
- la température introduite dans le calcul est celle de la mise en solution ;
- le CITD à subir une équilibration totale avec le CO_{2(g)}.

Alors, en combinant la loi d'action de masse concernant les espèces carbonées en solution et les facteurs de fractionnement , il vient :

$$\varepsilon(\text{CITD} \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{g})) \text{‰} \approx \varepsilon(\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{g}))\alpha + \varepsilon(\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{g}))\beta + \varepsilon(\text{CO}_3^{2-} \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{g}))\gamma$$

avec:

$$\alpha = K_1 / (H^+ \cdot ((K_1 / H^+) + 1 + (H^+ / K_2))) \quad (\text{proportion de H}_2\text{CO}_3 \text{ dans le CITD}),$$

$$\beta = 1 / ((K_1 / H^+) + 1 + (H^+ / K_2)) \quad (\text{proportion de HCO}_3^- \text{ dans le CITD}),$$

$$\gamma = H^+ / (K_2 \cdot ((K_1 / H^+) + 1 + (H^+ / K_2))) \quad (\text{proportion de CO}_3^{2-} \text{ dans le CITD}).$$

Le calcul a été conduit pour des valeurs de pH et de températures les plus courantes, à l'aide des formules de thermodépendance des § IV.1.2 et VI. Il figure en annexe 35.

VI.2.3 Présence des différents réservoirs de carbone à la Réunion.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre V , le CITD des eaux provient essentiellement, pour les eaux éloignées de l'océan, du CO₂ biogénique avec pour les eaux côtières une participation probable des carbonates solides (Fig.104).

VI.2.3.1 Le CO₂ biogénique.

La flore est dominée actuellement jusqu'à environ 800 m d'altitude par la canne à sucre (*Saccharum*) qui présente un cycle en C4; l'on est en droit de s'attendre à des CO_{2(g)} dans ces sols montrant des teneurs en ¹³C de l'ordre de -15 ‰ vs PDB (Lerman, 1974). Il est par ailleurs établi que la canne à sucre est cultivée depuis 1850 selon une répartition qui n'a pas beaucoup changé au cours des temps (Bougère & Gopal, 1986).

Pour les altitudes supérieures, la forêt et les plantations de plantes à parfum (Géranium, Vétiver) dominent; des teneurs en ¹³C du CO₂ du sol sont probablement de l'ordre de -25 ‰ vs PDB, puisque le cycle de ces plantes est en C3.

Enfin, les sols à allophanes sont caractérisés par des porosités élevées associées à des caractéristiques de fortes perméabilités pour les potentiels faibles (Wack3man, 1987) et un très fort pourcentage de matière organique donc, *a priori*, une forte pression de CO₂ biogénique. Ces propriétés particulières des andosols nous conduisent à accepter comme schéma directeur le schéma de l'équilibre isotopique avec le CO₂ biogénique, le CITD prélevé étant négligeable par rapport à la pression de CO₂ biogénique.

L'on remarquera que cette hypothèse peut être confirmée par le simple raisonnement suivant. Si l'on suppose une infiltration de 1,9mm.j⁻¹ (Cf. § III), où l'eau acquiert un CITD de 2.10⁻³ millimol.l⁻¹ (ce qui est une valeur forte dans les "hauts" (cf. §IV)), le flux de carbone dissous qui quitte le sol est alors de 3,8.10⁻³mol. m⁻².j⁻¹. Cette valeur est à comparer aux taux de production de CO₂ observé par Dever (1985) dans la craie de Champagne, où pour une zone de production de 0,5m les estimations sont de l'ordre de 173.10⁻³ mol. m⁻².j⁻¹, en hiver, 864.10⁻³mol. m⁻².j⁻¹, en été. Le milieu intertropical est connu pour l'exubérance de sa production végétale, et les valeurs de production sont certainement encore beaucoup plus fortes. Le prélèvement de carbone par la voie liquide est donc négligeable devant la production qui est, au minimum, 50 fois plus forte. Les facteurs de fractionnement gaz-CITD sont donc certainement proches de leur valeur d'équilibre (Annexe 35).

VI.2.3.2 Le CO₂ périvolcanique.

Les sources thermales des cirques, témoignent de l'activité géothermale persistante du volcan et leurs fortes teneurs en carbonates (TAC = 20 à 30 meq.l⁻¹) permettent d'affirmer qu'un apport de CO₂ profond est toujours possible d'une manière discrète dans les aquifères, comme cela se produit à Mayotte (Eberschweiler, 1986).

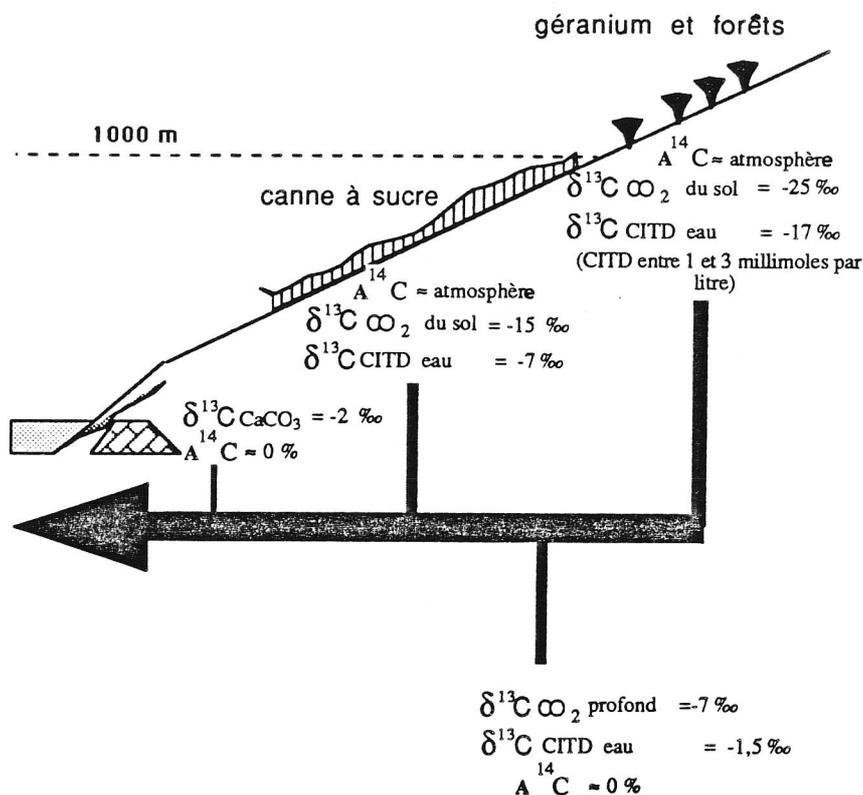


Fig.104: Schéma illustrant les différentes sources de carbone à la Réunion.

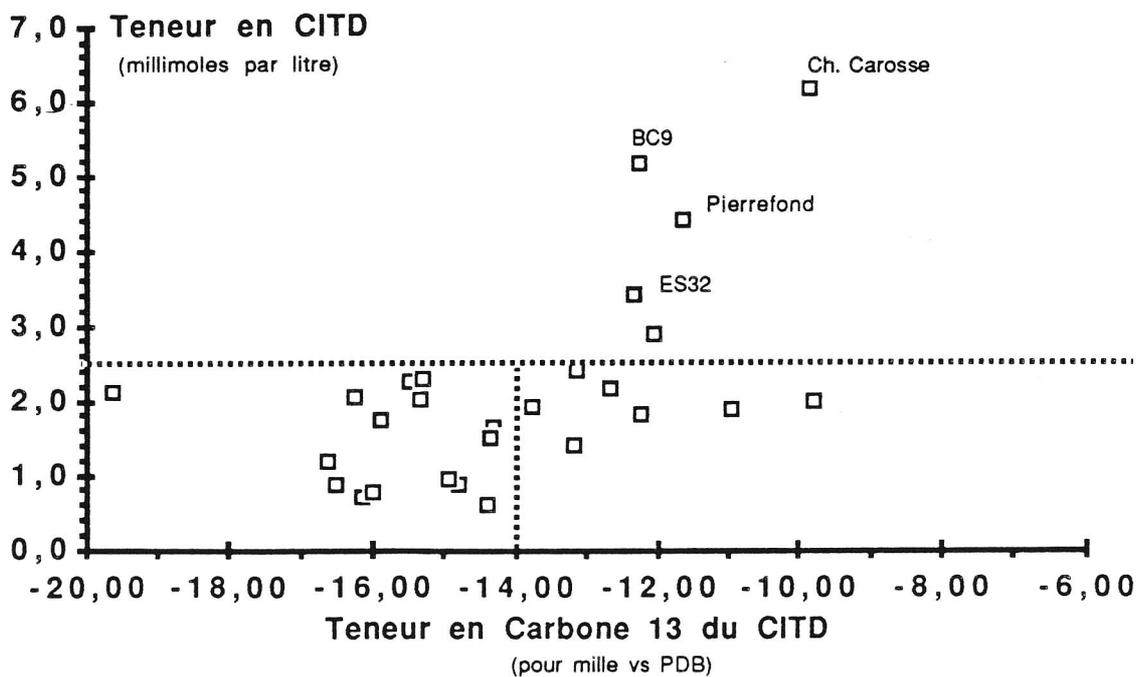


Fig.105: Relation entre teneur en carbone inorganique dissous (millimol.l⁻¹) et teneur en carbone 13 du CITD (pour mille vs PDB). Les points indicés sont les points d'eau situés dans des aquifères à porosité de matrice.

Les points avec des teneurs en ¹³C < -14 sont identifiables comme le résultat d'une mise en solution du CO₂ biogénique à l'équilibre sous végétation en C3.

Les teneurs enrichies sont probablement le fait d'autres sources de carbone, le CO₂ de la canne à sucre, le carbonate récifal, ...

VI.2.3.3 Les carbonates marins.

En bord de mer, les aquifères libres se situent souvent au contact des sables détritiques à éléments coralliens. De plus, il existe probablement d'anciennes barrières récifales, fossilisées par les coulées. Tout ceci rend possible l'intervention du réservoir carbonate marin dans la minéralisation carbonatée.

VI.2.4 Résultats des analyses des précipités.

Les 30 analyses de teneurs en ^{13}C et les mesures chimiques font l'objet des tableaux, 14, 15. Les précipités ont été effectués à la fin de la saison sèche 1987. Le calcul des teneurs en CO_2 équilibrant s'est effectué à l'aide de l'annexe 35, selon les équations décrites précédemment (§ VI.2.2). Si l'on excepte celles des sources thermales, les valeurs obtenues reportées dans un histogramme, font apparaître une distribution bimodale des teneurs en ^{13}C du CO_2 équilibrant, la limite entre les deux populations se situant à la valeur -22‰ vs PDB. **Les teneurs appauvries peuvent être attribuées d'une manière certaine à une équilibration du CO_2 des sols sous une végétation de type C3 en équilibre avec la phase liquide percolante.**

Les teneurs enrichies (toujours en considérant le CO_2 équilibrant), peuvent provenir de trois phénomènes (Fig.104) :

- une influence du CO_2 issu des sols à canne à sucre,
- une influence d'un CO_2 volcanique enrichi,
- une dissolution ou un équilibre isotopique avec un carbonate solide enrichi.

Le report des couples CITD-teneur en ^{13}C du CO_2 équilibrant, fait apparaître (Fig.105) trois groupes d'eau.

1) Les points d'eau à teneurs en ^{13}C du CITD inférieures à -14‰ vs PDB ont des teneurs en CITD inférieures à $2,5\text{ mmol.l}^{-1}$, ces eaux ont donc des CITD compatibles avec la minéralisation carbonatée essentiellement biogénique observée dans les "hauts" (cf. §V). Leurs teneurs en ^{13}C sont également compatibles avec une équilibration isotopique avec le CO_2 d'un sol à végétation en C3.

2) Les points d'eau qui ont des teneurs en CITD supérieures à $2,5\text{ mmol.l}^{-1}$ sont essentiellement le fait d'aquifères à circulations à porosité matricielle; il s'agit des brèches pyroclastiques de S^t Gilles (BC9, Ch. Carrosse), des tufs d'Etang Salé (ES32), et de l'aquifère alluvial de la rivière S^t Etienne (Pierrefond). Au sein de ces aquifères, l'augmentation de teneur en CITD est probablement le fait d'une mise en solution d'une source de carbone enrichi en ^{13}C . Ces eaux sont toutes proches de la saturation en calcite.

Le fait que ces aquifères puissent être distingués de manière structurale conduit à deux hypothèses.

La mise en solution d'une plus grande quantité de carbone peut être seulement l'effet d'une $p\text{CO}_2$ plus forte ; en effet ES32, BC9 et Pierrefond sont situés sous des sols intensivement cultivés (canne à sucre) dans des aquifères libres et superficiels, ce qui peut expliquer à la fois les fortes teneurs en ^{13}C et en CITD.

Toutefois, la mise en solution d'une plus grande quantité de carbone peut être le fait de la présence d'un carbonate solide ou d'une contamination discrète de CO_2 volcanique. Cette hypothèse est plus probable pour Ch. Carrosse.

3) Les points d'eau qui présentent des teneurs en CITD inférieures à $2,5 \text{ mmol.l}^{-1}$ avec des teneurs en ^{13}C du CO_2 équilibrant supérieures à -14 ‰ vs PDB, sont, du fait, de leurs teneurs en CITD du même "ordre" que les eaux du premier groupe, difficilement explicables par une minéralisation carbonatée autre que biologique.

Ils peuvent être le fait d'un mélange d'eaux entre une eau infiltrée sous une végétation en C3, et une eau **infiltrée** au sein des cultures de la canne à sucre. Toutefois cette hypothèse est difficile à accepter puisque les altitudes d'alimentation sont généralement supérieures aux zones de cultures de la canne. Cette remarque est confirmée par l'examen de la relation entre altitude d'alimentation et teneur en ^{13}C (Fig.106) qui n'est pas univoque.

Ils peuvent aussi être le produit d'une rééquilibration isotopique partielle du CITD, par influence du CO_2 dégagé par la canne à sucre dans le sol lors de **la circulation de l'eau sous ces cultures**.

Dans les deux cas, il s'agit de l'influence de la végétation, mais dans le premier cas, c'est une relation hydrique et dans le deuxième d'une relation gazeuse. Si la deuxième hypothèse est adoptée, les circulations ne sont pas isolées de la surface et probablement peu profondes.

VI.2.5 Conclusion sur l'étude des teneurs en ^{13}C

L'étude a permis de montrer que les points d'eau à faible teneur en CITD et à teneur appauvrie en ^{13}C sont probablement le fait d'une minéralisation carbonatée par équilibration du CO_2 des sols sous une végétation du type C3.

Pour les teneurs enrichies en ^{13}C plusieurs sources de carbone restent possibles, bien qu'il existe une présomption sur le rôle déterminant du CO_2 de la canne à sucre, surtout pour les eaux à faible teneur en CITD. L'étude des teneurs en ^{14}C nous permettra certainement d'approfondir la discussion de cette hypothèse.

Teneur en carbone 13 du CITD

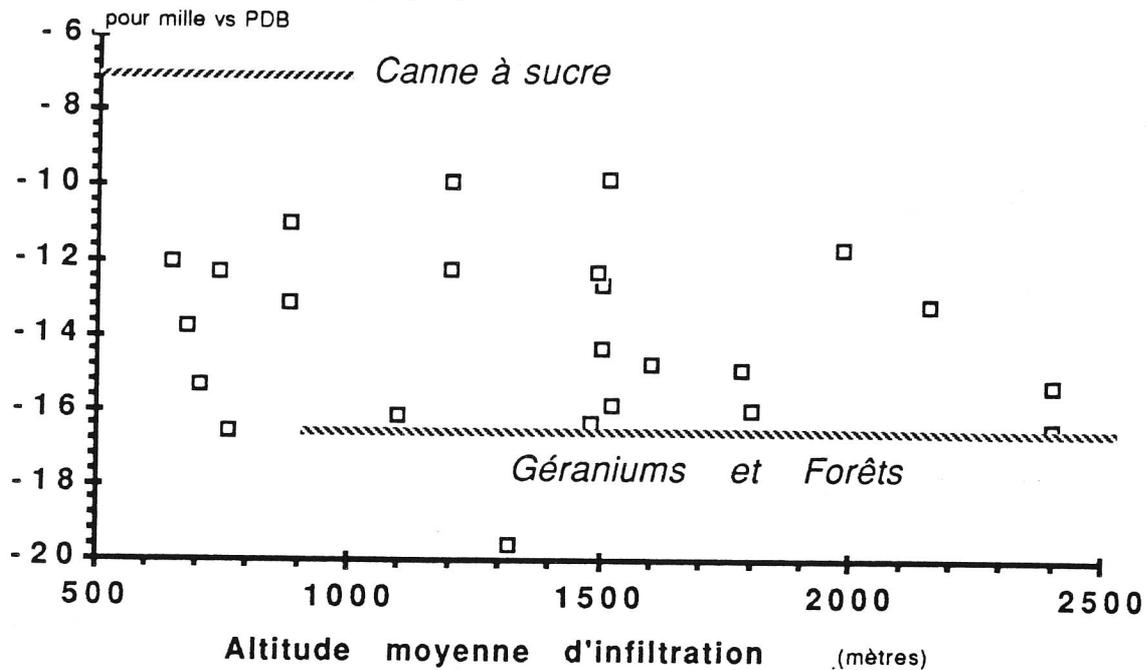


Fig.106: Relation entre teneur en ^{13}C du CITD (en pour mille vs PDB) et altitude d'alimentation (d'après les teneurs en ^{18}O). La figure montre la complexité de la "pollution" exercée par le CO_2 de la canne à sucre sur les teneurs.

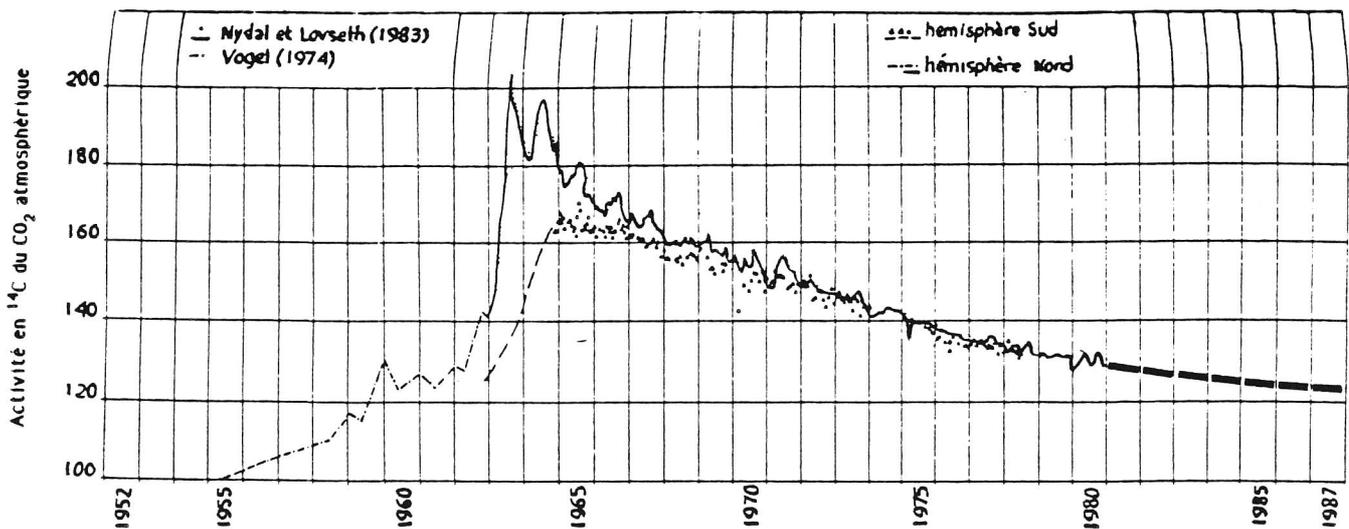


Fig.107: Activité du carbone 14 du CO_2 atmosphérique depuis 1952 dans les deux hémisphères, d'après les données de Nydal et Lovseth (1983) et Vogel (1974). La courbe est extrapolée jusqu'en 1987 (pointillés). Les teneurs des deux hémisphères semblent désormais comparables.

NOMS	Abrév.	cond	T°C	pH	TAC meq	+ +		+ +		- 2		- -	
		µS. par cm				Ca	Mg	Na	K	NO3	SO4	Cl	SiO2
						par litre				milligrammes par litre			
S IRENEE	CILTHER	2291	39,1	7,13	30,10	90,0	88,0	350,0	9,4	0,0	80,0	1,4	140,0
SMANES		1932	30,2	6,89	25,40	83,5	77,0	260,0	7,5	0,0	66,0	2,7	112,0
S VERONIQUE		1788	31,5	6,80	23,50	78,5	74,0	240,0	6,7	0,0	58,0	1,4	111,0
RES ST ANNE	RESTA	73	20,9	7,49	0,65	1,1	2,5	5,4	1,8	0,0	0,0	3,0	23,0
CM52	CM52	1143	23,2	7,47	1,90	4,9	20,0	189,0	10,0	16,0	41,0	279,0	21,0
EDF	EDF	55	14,0	7,54	0,55	0,8	1,4	4,4	1,5	0,0	0,0	0,5	12,0
LATANIERS	LAT.	189	22,6	7,34	1,90	4,5	13,0	7,8	1,0	0,0	1,2	7,0	18,0
BASSIN PIGEON	B.P.	144	19,6	7,72	1,15	1,3	4,0	13,0	1,4	0,0	2,5	13,0	42,0
SP3A	SP3	155	19,3	6,41	1,00	5,5	31,0	21,0	3,2	3,5	4,8	24,0	41,0
TAKAMAKA	TAK	58	14,0	7,62	0,60	0,7	1,5	4,8	1,9	0,0	0,0	1,3	13,0
SP29B	SP29B	190	21,5	7,41	1,80	3,4	6,8	18,0	1,6	15,7	7,0	22,0	56,0
TROU D'EAU	SGP14	1205	23,0	7,57	1,80	5,4	30,0	195,0	16,3	20,5	48,0	302,0	58,0
KAUFMANT	KAUF	433	24,3	7,56	2,25	5,0	12,0	29,4	3,8	28,0	14,0	56,0	66,0
BOUCAN 9	BC9	588	26,7	7,93	5,00	9,3	33,0	38,0	1,3	37,7	11,7	33,7	76,0
ES 32	ES32	620	24,0	7,97	3,30	22,0	42,0	27,0	4,0	58,2	21,2	78,1	37,8
DUCLÓS	DUCL	523	23,0	8,15	2,10	7,8	19,0	46,6	0,5	9,4	16,0	91,0	48,0
SG26	SG26	365	23,6	7,69	1,92	2,8	11,0	52,0	4,2	19,0	12,5	46,2	57,0
PIERREFOND	PIER.	500	25,0	8,52	4,30	22,0	21,0	24,1	9,0	21,5	7,0	27,0	22,0
SAL N°2	SAL2	210	20,0	7,52	2,10	6,5	10,0	9,5	2,3	4,8	8,0	3,5	41,0
GR.FONTAINE	SP1	208	20,5	7,76	1,34	3,0	6,0	23,0	2,8	2,0	4,6	21,3	43,6
GRANDE RAV	GRRAV	414	19,6	7,94	0,85	4,5	8,0	56,8	5,1	0,0	14,0	113,0	36,0
CH.CAROSSE	CH. CAR	582	22,0	7,91	5,95	5,5	6,6	144,0	0,7	0,0	4,0	48,0	8,0
SP6	SP6	170	18,1	7,70	0,75	3,3	5,2	13,1	2,8	2,4	2,3	15,0	31,0
RAV MALHEUR	POSS68	171	19,0	7,70	1,65	3,7	9,4	7,9	1,9	0,0	2,0	6,0	47,0
SL 41B	SL41B	931	19,0	7,65	0,90	5,7	16,0	148,0	6,7	0,0	32,0	256,0	17,0
S. BOUILLON	SP2	207	19,8	7,72	2,20	2,8	6,2	19,9	2,8	7,8	5,0	23,0	22,0
SANS SOUCIS		152	20,3	8,62	1,75	4,3	4,4	14,4	1,2	0,0	2,0	4,0	34,0
S.CADET	TEV34	90	14,0	7,44	0,80	2,7	3,6	4,7	7,6	0,0	0,0	3,0	26,0
SG.18	SG18	212	24,0	7,73	1,80	16,6	6,0	14,5	5,3	1,5	5,8	24,0	2,0
S.MOULIN	SP8	1250	20,5	7,47	1,50	6,1	30,0	221,0	13,0	11,0	55,0	364,0	26,0
S.ST LEU	S STLEU	358	23,0	7,98	2,80	4,0	13,0	41,0	5,4	11,5	10,0	25,0	48,0
S.G. 56	SG56	672	21,3	7,82	1,75	3,3	9,0	108,0	4,9	6,8	21,5	147,0	35,0
SPPHI	SPPHI	182	20,6	7,52	1,40	14,5	6,8	11,5	1,4	8,0	2,0	9,5	53,0

Tab.14: Résultats des analyses chimiques des eaux souterraines (saison sèche 1987) ayant fait l'objet d'un échantillonnage de leur fraction carbonatée et sulfatée.

Tab.15: Résultats des analyses isotopiques des espèces du carbone inorganique en solution.

NOMS	T°C	pH	CITD milli moles par litre	logPCO2 atmo- sphères	1 3		fraction.. hypothèse de l'équilibre avec le CO2 pour mille vs PDB.	1 3		1 4 C act. % mesur.	± %	activité initiale avec équil. %	Δ(14C) = -25,0	Δ(14C) = -15,0
					C du CITD	O du CITD		C du CO2 équil.	C du CO2 équil.					
S IRENEE	39,1	7,13	35,7	-0,8	-1,64	-11,98	-5,0	-6,6						
SMANES	30,2	6,89	33,6	-0,6										
S VERONIQUE	31,5	6,80	32,9	-0,6	-1,84	-12,48	-5,5	-7,4						
RES ST ANNE	20,9	7,49	0,7	-2,8	-16,16	-3,38	-7,7	-23,9						
CM52	23,2	7,47	2,1	-2,3	-16,25	-5,85	-7,4	-23,7	109,8	1,8	107,9	77,0	101,2	
EDF	14,0	7,54	0,6	-2,9	-14,39	-5,01	-8,4	-22,8						
LATANIERS	22,6	7,34	2,1	-2,2	-19,61	-7,92	-7,3	-26,9						
BASSIN PIGEON	19,6	7,72	1,2	-2,8	-16,61	-6,80	-8,1	-24,7						
SP3A	19,3	6,41	2,0	-1,5										
TAKAMAKA	14,0	7,62	0,6	-3,0										
SP29B	21,5	7,41	2,0	-2,3	-9,79	-4,72	-7,9	-17,7	125,5	1,2				
TROU D'EAU	23,0	7,57	1,9	-2,4	-13,77	-3,81	-7,6	-21,4	118,4	2,1	116,7	158,9	180,7	
KAUFMANT	24,3	7,56	2,4	-2,3	-13,15	-7,92	-7,5	-20,6	126,1	1,7	124,4	239,5	255,6	
BOUCAN 9	26,7	7,93	5,2	-2,4	-12,26	-7,03	-7,5	-19,8	81,9	4,7				
ES 32	24,0	7,97	3,4	-2,6	-12,33	-5,90	-7,7	-20,0	128,5	0,9	126,7	260,5	277,1	
DUCLÓS	23,0	8,15	2,2	-3,0	-12,66	-4,78	-7,9	-20,6	68,4	0,6				
SG26	23,6	7,69	2,0	-2,5	-15,33	-6,52	-7,7	-23,1						
PIERREFOND	25,0	8,52	4,4	-3,0	-11,65	-4,73	-8,0	-19,6	126,0	1,4				
SAL N°2	20,0	7,52	2,3	-2,3	-15,49	-4,41	-7,8	-23,3						
GR.FONTAINE	20,5	7,76	1,4	-2,8	-13,18	-5,05	-8,0	-21,2	117,0	1,0				
GRANDE RAV	19,6	7,94	0,9	-3,1	-14,80	-5,67	-8,3	-23,1						
CH.CAROSSE	22,0	7,91	6,2	-2,3	-9,86	-6,02	-7,9	-17,7	118,0	1,5				
SP6	18,1	7,70	0,8	-3,0	-16,00	-6,05	-8,1	-24,1	105,0	1,7	103,1	30,1	52,4	
RAV MALHEUR	19,0	7,70	1,7	-2,6	-15,89	-3,16	-8,1	-24,0	120,0	1,0				
SL 41B	19,0	7,65	1,0	-2,8	-14,94	-5,11	-8,1	-23,0	101,6	2,6	99,8	-4,2	15,9	
S. BOUILLON	19,8	7,72	2,3	-2,5	-15,30	-4,60	-8,0	-23,3	113,2	1,6	113,2	108,9	132,8	
SANS SOUCIS	20,3	8,62	1,8	-3,5										
S.CADET	14,0	7,44	0,9	-2,7	-16,50	-4,05	-8,2	-24,7						
SG.18	24,0	7,73	1,9	-2,6	-10,97	-9,91	-7,6	-18,6	116,0	1,3				
S.MOULIN	20,5	7,47	1,6	-2,4	-14,34	-4,15	-7,7	-22,1	108,3	1,9	106,5	60,4	81,4	
S.ST LEU	23,0	7,98	2,9	-2,7	-12,05	-2,58	-7,9	-20,0	131,0	1,7				
S.G. 56	21,3	7,82	1,8	-2,7	-12,23	-4,49	-8,0	-20,2	111,7	1,4	109,9	94,1	109,9	
SPPHI	20,6	7,52	1,5	-2,6	-14,36	-5,41	-7,7	-22,1	111,8	2,6	111,8	96,1	116,4	

VI.3 ETUDE DE LA MINERALISATION CARBONATEE A L'AIDE DU ^{14}C .

VI.3.1 Généralités.

Le carbone 14 (^{14}C) est un isotope radioactif du carbone qui présente une période ou demi-vie de $5730 \text{ ans} \pm 30 \text{ ans}$ (Godwin, 1962).

Sa formation est due à l'impact des neutrons sur l'azote 14 (spallation). Cette formation se produit, soit dans la haute atmosphère (neutrons secondaires cosmiques), soit lors des essais thermo-nucléaires dans l'atmosphère.

Avant l'ère industrielle les activités du ^{14}C du CO_2 de l'atmosphère ont varié de manière assez peu sensible ; par simplification elles sont prises comme proches de 100 %.

Dès 1850, l'utilisation de combustibles fossiles fait décroître l'activité atmosphérique par dilution avec du carbone "mort" (fossile), c'est "l'effet Suess" (Suess, 1971).

Dès 1950, la multiplication des essais thermo-nucléaires aériens provoque une augmentation considérable de l'activités du ^{14}C du CO_2 de l'atmosphère (Fig.107), jusqu'en 1963 date du moratoire sur les essais aériens. Du fait de l'isolement relatif entre les deux hémisphères météorologiques, il se produit un léger décalage des maxima de leur teneur respective (Nydal & Lövseth, 1983). Depuis 1972 les activités apparaissent homogènes dans les deux hémisphères, et continuent de décroître. Par extrapolation de la courbe on obtient une activité d'environ 122% pour l'année 1987 (Levin *et al.*, 1988).

La transition entre les teneurs ^{14}C du CO_2 de l'atmosphère et celles du CITD des eaux s'opère par les mêmes voies que pour ^{13}C , (§IV.2) les fractionnements sont bien moindres, quoique linéairement liés (Saliège, 1979 ; Saliège et Fontes, 1983):

$$\varepsilon(^{14}\text{C})\% = 0,23 \cdot \varepsilon(^{13}\text{C})\%$$

Ceci implique qu'un appauvrissement en ^{13}C de -10 ‰ conduit à un affaiblissement de -2,3% de l'activité ^{14}C . Comme on le voit, les fractionnements subis par le carbone lors de sa mise en solution sont pratiquement sans effet sur son activité. Il en va autrement pour les mélanges et les échanges isotopiques qui peuvent affecter l'activité du CITD ; en effet en présence d'une source de carbone d'une activité plus faible, le CITD de l'eau subit un "vieillissement" apparent et voit son activité décroître par mélange et échange isotopique. Cette source de carbone peut être un carbonate solide, par exemple un carbonate récifal dans le cas qui nous intéresse, ou, une source de CO_2 volcanique. Dans ce cas, on aura recours à un modèle de correction des activités pour rechercher l'activité initiale, (avant mélange et/ou échange). Les modèles se sont développés depuis les années 1960, avec les modèles de Ingerson & Pearson (1964), Vogel (1970), Tamers (1975), Mook (1972, 1976), Fontes & Garnier (Garnier, 1976; Fontes, 1976; Fontes & Garnier, 1976, 1979).

Dans la plupart des cas, la connaissance des teneurs en ^{13}C est nécessaires pour rendre compte des sources de carbone et des fractionnements. Quoi qu'il en soit, l'on ne "date" que l'entrée du carbone dans le cycle de l'eau par le sol. De plus, cet "âge" ne préjuge pas des effets de mélange et de réserves et constitue la distribution moyenne des temps de séjour du CITD (Fontes , 1976).

VI.3.2 Etude du couple ^{14}C - ^{13}C dans les aquifères.

Dix points ont fait l'objet de mesures d'activités en ^{14}C consignées dans le tableau 15.

Les activités mesurées sont toutes supérieures à 100%, le CITD des eaux provient donc d'un CO_2 moderne, postérieur au début des essais nucléaires aériens de 1952, soit un "âge" moyen inférieur à 35 ans (Fig.107).

L'échantillon présentant l'activité la plus forte, ES32, possède aussi le CITD le plus fort.

Sur un diagramme $A(^{14}\text{C})$ versus teneur en CITD (Fig.108), il apparaît une corrélation significative des deux variables. Cette corrélation ($R= 0,89$) **exclut très probablement l'intervention d'un carbone mort dans la minéralisation carbonatée. L'acquisition du CITD serait donc exclusivement le fait du CO_2 biogénique.**

L'examen de la relation entre les teneurs en ^{13}C et en $A(^{14}\text{C})$ (Fig.109) montre que les activités les plus fortes sont surtout le fait des échantillons les plus enrichis en ^{13}C . La source de la minéralisation carbonatée serait donc un CO_2 biogénique moderne, enrichi en ^{13}C .

Enfin, les valeurs de $A(^{14}\text{C})$ montrent une tendance à la corrélation directe avec les teneurs en nitrates (Fig.110).

En résumé, les fortes activités en ^{14}C sont le fait :

- des eaux les plus riches en CITD,
- des eaux les plus riches en ^{13}C ,
- des eaux les plus polluées en nitrates.

On peut donc penser que le CO_2 de canne à sucre constitue le pôle le plus probable pour expliquer le cumul de ces caractéristiques. Le report des points altitudes d'alimentations vs $A(^{14}\text{C})$ dans un diagramme (Fig.111), montre que les activités les plus fortes (>118%) sont le fait de points d'eau avec une altitude d'alimentation inférieure à 1000m. Ces eaux ont pu s'infiltrer, partiellement, dans la canne à sucre et acquérir, par la même, un CITD plus élevé.

Les points d'eau avec des altitudes d'alimentation supérieures à 2000 m montrent des activités supérieures à celles des infiltrations inférieures. Peut être s'agit-il, ici, d'un phénomène de contamination du CITD des eaux infiltrées sous une végétation en C3 par leur passage sous les cultures de la canne à sucre .

La recherche de l'activité initiale, suppose la correction du fractionnement subi lors du passage CO_2 - CITD. les activités sont alors corrigées (Tab.15):

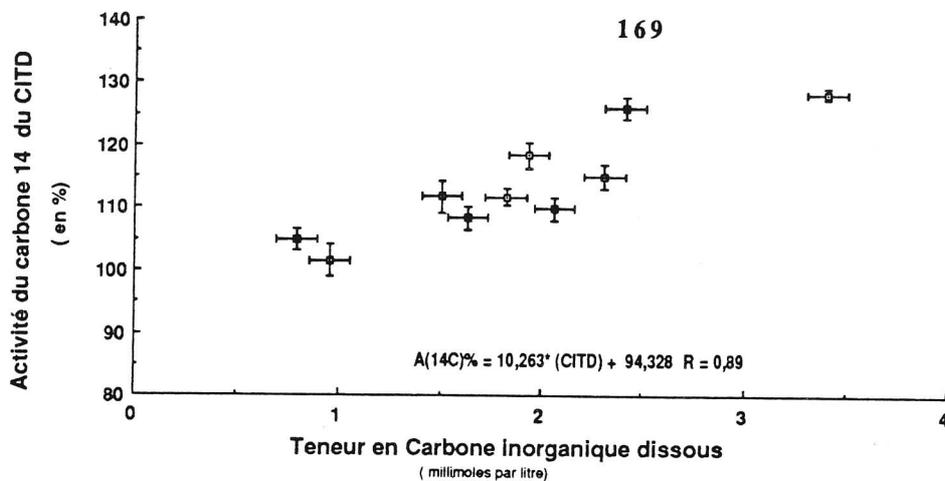


Fig.108: Relation entre l'activité en carbone 14 du CITD et la teneur en carbone inorganique dissous. Les paramètres montrent une corrélation significative, comme s'il existait une source de minéralisation carbonatée à base de carbone "moderne".

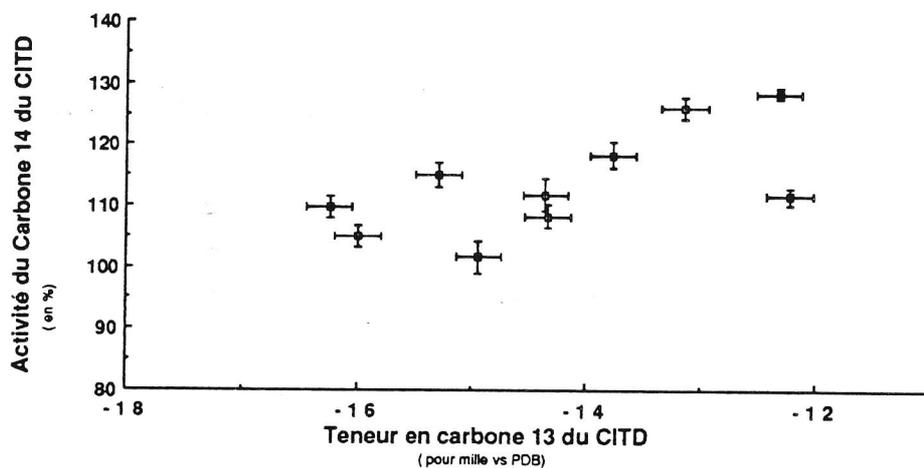


Fig.109: Relation entre activité du carbone 14 (%) et teneur en carbone 13 du CITD. Les fortes activités sont le fait d'échantillons relativement enrichis en carbone 13.

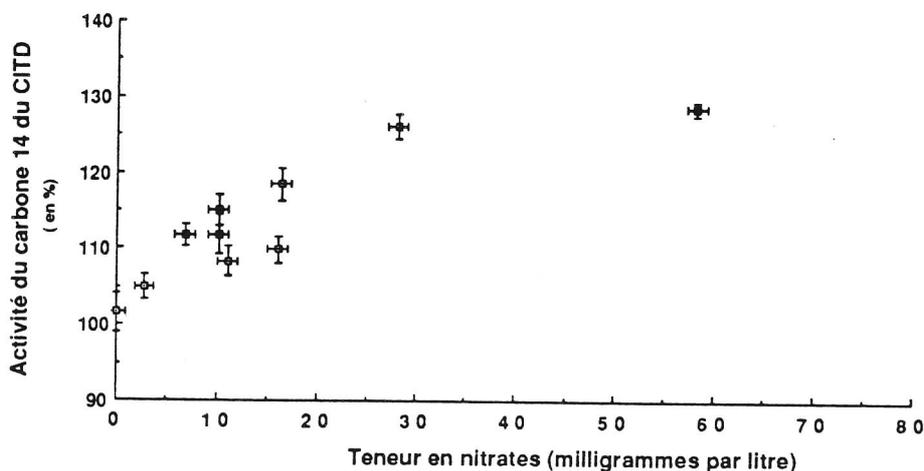


Fig.110: Relation entre les activités en ^{14}C du CITD (%) et les teneurs en nitrates. Les points aux plus fortes activités sont des points à fortes teneurs en nitrates.

- dans le cas d'une végétation en C3 (teneur en $^{13}\text{C} = -25\text{‰ vs PDB}$),
- dans le cas d'une végétation en C4 (teneur en ^{13}C du $\text{CO}_2 = -15\text{‰ vs PDB}$),

Les activités initiales sont probablement intermédiaires. On utilise aussi l'unité $\Delta\text{‰}$ qui intègre un fractionnement rapporté à la végétation en C3 (Stuiver & Polach, 1977).

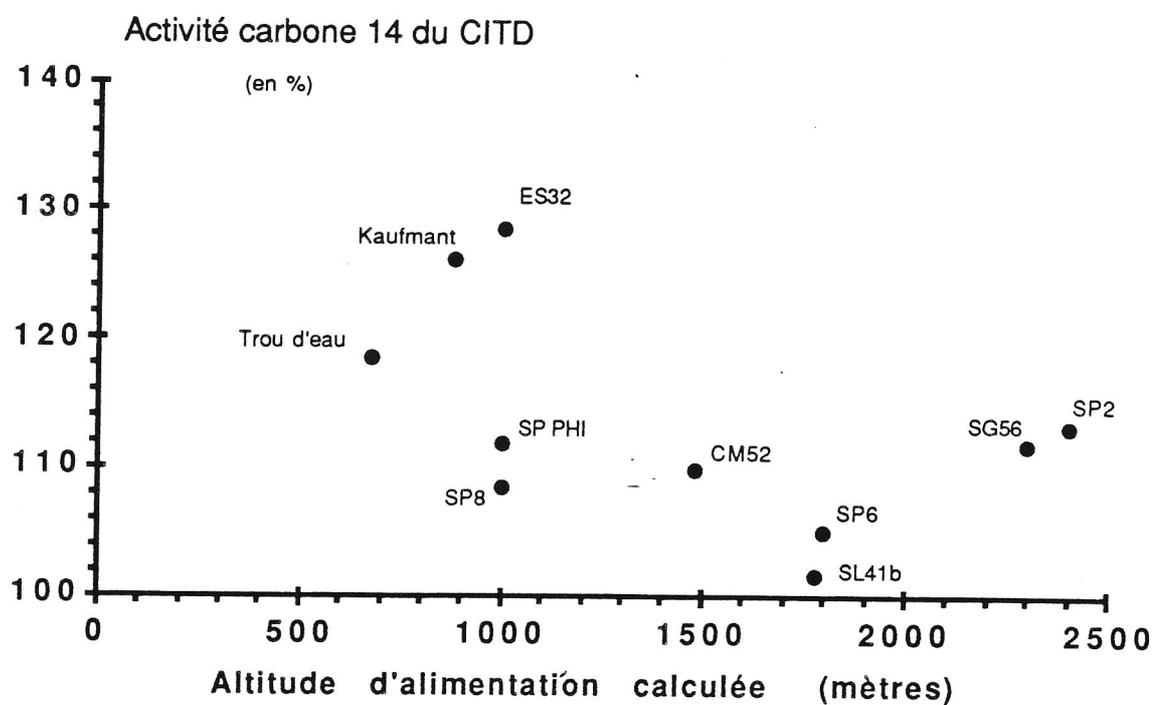


Fig.111: Relation entre activité en carbone 14 du CITD et altitude d'alimentation (d'après les teneurs en ^{18}O). Les CITD les plus enrichis semblent être plutôt le fait des faibles altitudes d'alimentation.

VI.3.2 Conclusion sur la minéralisation carbonatée.

L'étude a mis en évidence deux sources essentielles de carbone que sont les deux types de végétations les plus courants sur le Massif du Piton des Neiges. Il n'y a manifestement pas de source de minéralisation de carbone fossile dans les points que nous avons échantillonnés. Il faut tout de même rappeler que l'échantillonnage s'est efforcé d'éviter les points d'eau trop manifestement en contact avec les sables coralliens. Les activités reflètent des minéralisations et des eaux probablement récentes.

VI.4 ETUDE ISOTOPIQUE DE LA MINERALISATION SULFATEE.

VI.4.1 GENERALITES

Les teneurs isotopiques en ^{34}S et ^{18}O des sulfates aqueux sont utilisées en appoint des méthodes chimiques pour connaître la participation des différents réservoirs de soufre et de sulfates dans la minéralisation des eaux. De même, la connaissance des variations isotopiques permet, dans certains cas la reconnaissance de processus particuliers pendant ou après la mise en solution, tels :

- la précipitation de minéraux sulfatés,
- la réduction des sulfates,
- la production de sulfates par oxydation de sulfures.

Ces processus, lorsqu'ils sont incomplets, affectent fortement les compositions isotopiques des sulfates aqueux. L'effet de ces processus sur les compositions isotopiques peut être résumé succinctement dans un diagramme des teneurs en ^{34}S vs teneurs en ^{18}O (Fontes et Michelot, 1983) (Fig.112).

Les domaines de variations naturelles des teneurs isotopiques des sulfates et du soufre, sont le fait de plusieurs "réservoirs" .

Le principal réservoir de sulfate est l'océan, les teneurs isotopiques y sont assez constantes et leur moyenne est de (Leone *et al*, 1987; Longinelli, 1988):

$$^{34}\text{S} (\text{SO}_4^{2-}) = +20 \pm 0,25 \text{ ‰ vs CD}$$

$$^{18}\text{O} (\text{SO}_4^{2-}) = +9,45 \pm 0,15 \text{ ‰ vs SMOW.}$$

Il est à noter que les valeurs océaniques ont varié selon les époques géologiques (Claypool *et al*, 1980 in Fontes & Michelot, 1983; Pierre, 1982). Les évaporites anciennes reflètent ce phénomène.

Les sulfates dans les pluies, montrent des teneurs enrichies en ^{18}O et appauvries en ^{34}S vis-à-vis du sulfate marin (Rafter & Mizutani, 1967; Mizutani et Rafter, 1969; Rightmire *et al*, 1974):

$$^{34}\text{S} (\text{SO}_4^{2-}) = \text{de } +8 \text{ à } +14 \text{ ‰ vs CD (avec une moyenne de } +10,2),$$

$$^{18}\text{O} (\text{SO}_4^{2-}) = -1,5 \text{ à } 19,4 \text{ ‰ vs SMOW.}$$

Dans les sulfures primordiaux, volcaniques ou magmatiques, les teneurs en ^{34}S sont proches de celles de l'étalon:

$$^{34}\text{S} (\text{SO}_4^{2-}) \text{ proche de } 0 \text{ ‰ vs CD (Krouse, 1980).}$$

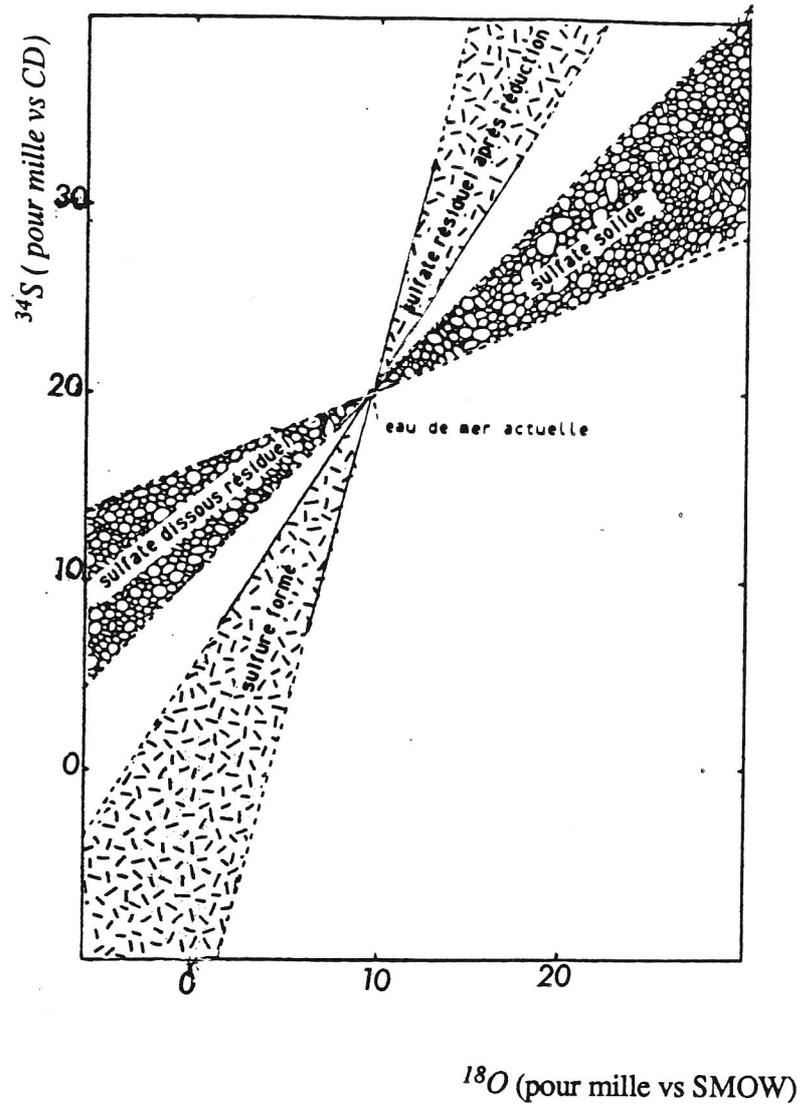


Fig.112: Diagramme illustrant les effets des différents processus affectant les sulfates dissous sur les teneurs en ^{34}S (pour mille vs CD) et en ^{18}O (pour mille vs SMOW) des sulfates d'après Fontes et Michelot (1983).

VI.4.2 Etudes des sulfates dissous dans les eaux réunionnaises.

Onze précipités ont été analysés et font l'objet du tableau 16.

Parmi ces 11 analyses de teneur en ^{18}O , 3 n'ont pu faire l'objet d'une analyse de teneur en ^{34}S (absence de gaz au spectromètre de masse).

Remarque: Les difficultés analytiques rencontrées sont peut-être le fait d'une température insuffisante lors de la réduction du sulfate, faux contact dans le filament de chauffe en platine, comme cela s'est produit peu après le traitement des échantillons.

D'autre part, parmi ces trois précipités, deux présentent des teneurs en ^{18}O appauvries par rapport aux autres d'au moins 2 ‰. Il n'est donc pas tenu compte de ces trois échantillons dont l'analyse pourrait être mise en doute.

teneurs en :	^{18}O	^{34}S	^{18}O
	du sulfate	du sulfate	de l'eau
	pour mille vs SMOW	pour mille vs CD	pour mille vs SMOW
S IRENEE	1,22	6,64	-9,17
BASSIN PIGEON	7,58	20,29	-7,84
SP29B	4,37	-	-6,40
KAUFMANT	6,69	16,30	-5,76
ES 32	6,95	13,06	-6,24
DUCLOS	7,22	16,20	-5,78
SP6	6,67	18,80	-6,31
SL 41B	7,35	17,55	-6,37
SMOULIN	6,50	21,66	-5,79
S.ST LEU	1,29	-	-4,08
S.G. 56	7,17	-	-5,46

Tab.16: Résultats des analyses en ^{34}S et ^{18}O des sulfates dissous, et en ^{18}O de l'eau.

Dans un diagramme où sont reportées les teneurs en ^{18}O et ^{34}S (Fig.113), il apparaît très nettement qu'un échantillon se distingue des autres; il s'agit des "thermes de Cilaos" qui présente des teneurs appauvries en isotopes lourds par rapport aux autres. Les autres points d'eau forment un groupe, assez homogène par ces valeurs en ^{18}O (moyenne = +6,99 ‰ vs SMOW, écart type = 0,37) mais qui présente des variations importantes en ^{34}S de +21,66 à +13,06 ‰ vs CD. Classiquement, le processus invoqué pour expliquer une telle répartition est l'oxydation de sulfures, car dans ce cas, les modifications des teneurs en ^{18}O dépendent de la participation relative dans la réaction d'oxydation, de l'oxygène dissous et de l'oxygène de l'eau (Stumm & Morgan, 1981; Tayloret al, 1984)). On comprend alors que ce phénomène implique une relative indépendance des teneurs en ^{34}S et en ^{18}O des sulfates. Le report des couples des teneurs $^{18}\text{O}(\text{SO}_4^{2-})$ et $^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ dans un diagramme (Van Everdingen & Krouse, 1985) permet, si l'hypothèse de l'oxydation des sulfures est adoptée, de déterminer le caractère, oxygéné ou non, du milieu de réaction (Fig.114). Il

Soufre 34 des sulfates

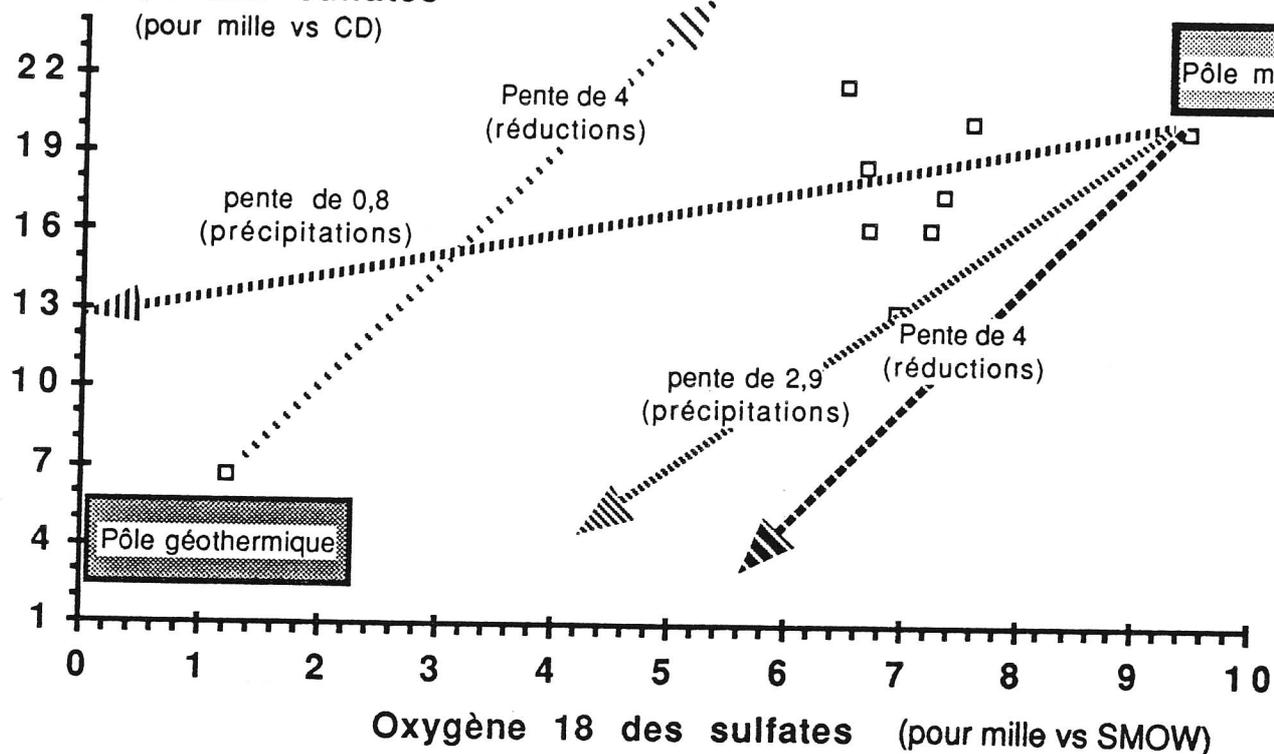


Fig.113: Teneurs en ^{34}S (pour mille vs CD) versus teneurs en ^{18}O (pour mille vs SMOW) des sulfates dissous. Mis à part les thermes de Cilaos, les teneurs en ^{18}O semblent invariants par rapport aux teneurs en ^{34}S cette situation est souvent interprétée comme l'effet de l'oxydation de sulfures.

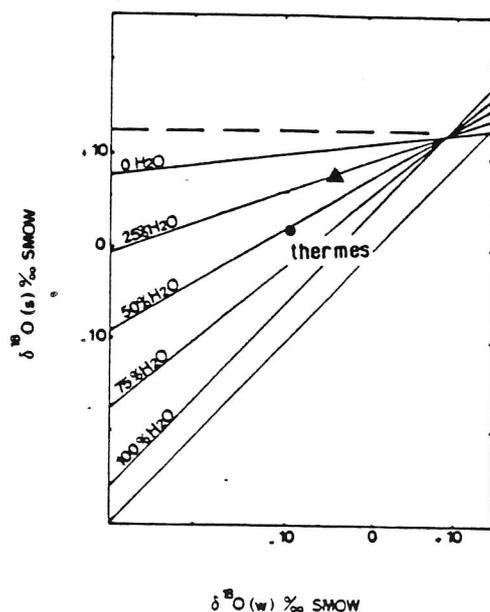


Fig.114: Diagramme ^{18}O du sulfate dissous vs ^{18}O de l'eau en fonction de la participation variable de l'oxygène de l'eau à l'oxydation des sulfures, d'après Van Everdingen et Krouse (1985). Si les sulfates dissous sont issus de l'oxydation de sulfures, la réaction s'est produite en milieu plutôt aérobie (25% H_2O), sauf pour les thermes de Cilaos (50% H_2O).

apparaît alors que les points représentatifs des couples de teneurs se répartissent principalement près de la droite d'oxydation avec une participation de 25% de l'oxygène de l'eau ce qui implique un milieu assez aéré sauf pour les thermes de Cilaos dont le point figuratif s'approche de la droite d'oxydation correspondant à l'intervention de 50% de l'oxygène de l'eau.

Le problème de cette interprétation est qu'elle est difficilement compatible avec :

- la bonne corrélation observée entre les teneurs en sulfate et teneurs en ions chlorures qui marque l'omniprésence de l'influence marine;
- les teneurs élevées en sulfates de certaines eaux, qu'il semble difficile de lier à une oxydation de sulfures.

VI.4.3 Corrélations avec les paramètres chimiques.

Si l'on reporte les points représentatifs des couples $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{Na}^+]$ et ^{34}S (SO_4^{2-}) dans un diagramme (Fig.115), il apparaît une tendance à la décroissance du rapport au fur et à mesure que les teneurs du sulfate s'enrichissent en ^{34}S . Cette décroissance se stabilise pour des valeurs supérieures à +18 ‰ vs CD et des valeurs de $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{Na}^+]$ inférieures à 0,25 (qui représente le rapport marin). Elle peut être expliquée par le mélange de deux pôles distincts de minéralisation sulfatée.

L'un serait le pôle marin:

- soit direct dans le cas de la source du moulin, et du Forage SL41b qui sont caractérisés par de fortes teneurs en chlorures, supérieures à 200mg.l^{-1} ,
- soit indirect par les embruns et pluies dans le cas de SP6 et Bassin Pigeon qui présentent des teneurs en ions chlorures inférieures à 20mg.l^{-1} .

L'autre serait le pôle de minéralisation sulfatée caractérisé par des "excès" en ions sulfates vis-à-vis des rapports marins (cf. §V) ; les points d'eau correspondants présentent des teneurs intermédiaires en ions chlorures , entre 50 et 100mg.l^{-1} .

Deux hypothèses s'affrontent pour définir la nature du pôle de minéralisation sulfatée.

Du fait des teneurs isotopiques observées dans l'eau de la source thermale, il est plausible d'imaginer, avec une pente supérieure à 0,8 et inférieure à 2,9, (Fig.113) une droite de "précipitation" qui relierait les teneurs isotopiques des sulfates solides précipités par la source thermale aux teneurs isotopiques des sulfates aqueux de ES32. Comme la dissolution n'est suivie d'aucun effet isotopique, le pôle de mélange pourrait être constitué de la dissolution d'anciennes concrétions sulfatées géothermales.

Du fait des teneurs en nitrates plus élevées dans les eaux appauvries en ^{34}S (SO_4^{2-}) , il apparaît aussi (Fig.116) que le pôle de sulfate reconnu pour les eaux analysées, pourrait être simplement un pôle de pollution anthropique lié aux traitements antiparasitaires sur les cultures de la canne à sucre.

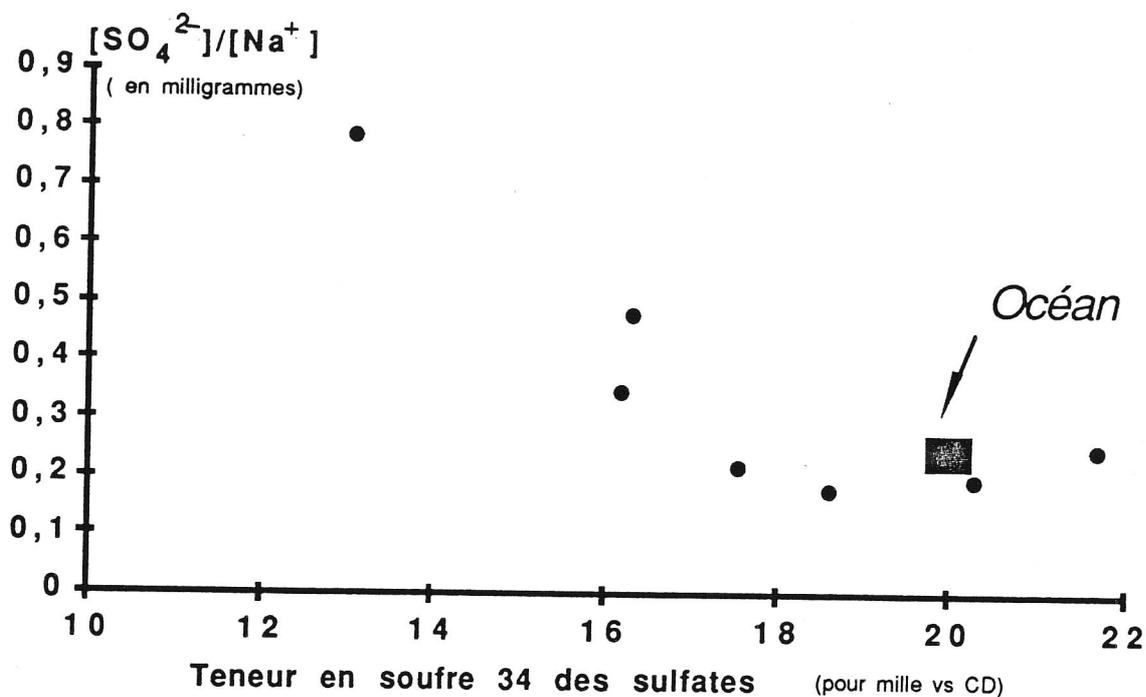


Fig.115: Relation entre $[SO_4^{2-}]/[Na^+]$ (milligrammes) et les teneurs en ^{34}S (pour mille vs CD) du sulfate aqueux. La figure montre une tendance à l'enrichissement en ^{34}S lorsque le rapport évolue vers un rapport marin (0,25).

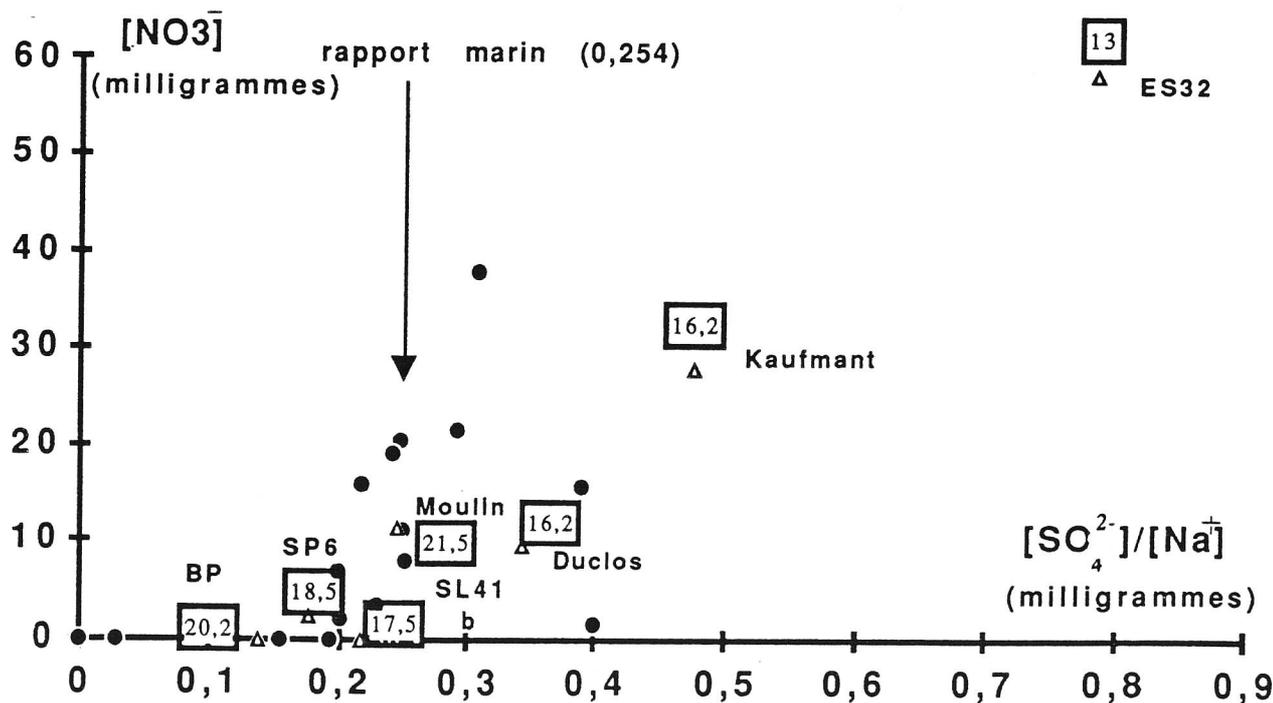


Fig.116: Diagramme $[SO_4^{2-}]/[Na^+]$ vs $[NO_3^-]$ (milligrammes) avec les teneurs en ^{34}S (pour mille vs CD) encadrées. La figure met en évidence un pôle de pollution en sulfates, lié aux nitrates qui influe sur les compositions isotopiques.

VI.5 CONCLUSIONS SUR L'ETUDE ISOTOPIQUE.

L'étude a permis d'affiner la connaissance des pôles géochimiques à travers la minéralisation des eaux en zone côtière que nous avons décrit comme carbonatée et sulfatée. La canne à sucre est probablement un pôle essentiel de cette minéralisation des eaux, elle induit une augmentation des teneurs en CITD, un apport de nitrates et probablement en sulfates.

L'étude renseigne aussi sur l'hydrodynamique de la zone de la côte ouest, les bassins versants hydrogéologiques ne semblent pas correspondre aux bassins versants hydrologiques apparents. Les variations des teneurs en ^{18}O renseignent aussi sur les conditions des circulations qui montrent épisodiquement des variations saisonnières, les circulations sont parfois très rapides. L'étude des activités du ^{14}C montre un CITD issu des sols des "Hauts" correspondant aux teneurs observées dans l'atmosphère des années cinquante dans l'hémisphère nord, probablement, quelques années plus tard dans l'hémisphère sud (Fig.107).

CHAPITRE SEPTIEME
CONCLUSIONS GENERALES

La conclusion comporte deux parties :

-une synthèse des principaux résultats ,

-une réflexion méthodologique sur les perspectives d'une utilisation de l'outil isotopique dans les îles volcaniques intertropicales.

VII.1 SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RESULTATS.

VII.1.1 Les pluies.

VII.1.1.1 Chimie.

Les teneurs chimiques des précipitations dépendent, dans une île à fort relief, essentiellement de la proximité marine dont l'influence est modulée par la déflation des vents dominants. De plus, il semblerait que la proximité du volcan actif sous le vent ne soit pas sans incidences sur les teneurs observées. Quoi qu'il en soit, dès que l'on s'élève en altitude, l'apport en éléments devient négligeable vis-à-vis de l'interaction eau-roche.

Enfin, à l'échelle journalière les teneurs sont remarquablement constantes si l'on excepte, toutefois, d'épisodiques périodes d'évaporation et de contamination par des embruns marins.

VII.1.1.2 Isotopes stables.

Les teneurs en ^{18}O dépendent essentiellement de "l'effet de masse" qui domine sur tous les autres phénomènes. Fort logiquement, cet effet est renforcé lors des épisodes de pluies cycloniques violentes, où les teneurs sont très fortement appauvries.

Les gradients altimétriques et thermométriques observés, semblent sous la dépendance de ces mêmes phénomènes, puisque l'on observe des gradients très faibles en saison cyclonique "normale", et pratiquement non calculables lors des précipitations de Clotilda. La relation entre ^{18}O et ^2H montre l'évaporation en cours de chute des pluies qui atteignent le sol à une altitude inférieure à 600m.

VII.1.2 Les sols.

VII.1.2.1 L'évaporation de nappe.

Les trois profils effectués sur des sites à nappe peu profonde et en situation d'évaporation marquée, ont permis, à l'aide des profils isotopiques:

- une estimation de leur flux évaporatoire par le modèle de Barnes et Allison (1983),

- de montrer que le modèle est cohérent pour des profils courts, même si la zone de diffusion en phase vapeur n'est pas rencontrée pour des profils inférieurs à 1,5 mètres.

Les profils des teneurs en chlorures ont permis l'approche dynamique du phénomène évaporatoire selon un modèle exponentiel de décroissance.

VII.1.2.2 L'évaporation et infiltration dans les "hauts".

Les profils réalisés montrent tous une évaporation dans les horizons superficiels. Ceci a donc permis l'application du modèle de Barnes et Allison (1983) qui donne un ordre de grandeur du flux évaporatoire inférieur à $100\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$ en situation de dessèchement.

En profondeur, les teneurs isotopiques montrent des variations importantes et brutales de teneurs. Ces accidents sont attribuables aux appauvrissements causés par les précipitations cycloniques à forte ascendance.

La recherche de ce type d'événements a permis d'évaluer les taux d'infiltration qui semblent proches de $1,9\text{mm}\cdot\text{j}^{-1}$ vers 1000m et qui sont inférieurs plus bas sur la côte ouest ($0,6\text{mm}\cdot\text{j}^{-1}$).

L'étude des teneurs en chlorures dans les sols humides des "hauts" s'est avérée infructueuse, peut être à cause de l'interaction entre la mesure des concentrations (très faibles) et la teneur en matière organique.

VII.1.3 Les eaux souterraines.

VII.1.3.1 Etude de la minéralisation.

Les eaux souterraines éloignées de l'océan montrent une minéralisation gouvernée par la mise en solution du CO₂ biogénique. La minéralisation cationique est fortement influencée par le degré de différenciation des roches magmatiques. Les teneurs montrent, pour ce qui concerne Na⁺ et Mg²⁺ une bonne conformité avec le modèle d'acquisition de minéralisation (Wackermann, 1981) en fonction des phases minérales présentes. Les teneurs en Ca²⁺ et K⁺ ne semblent pas suivre le modèle. Il est alors possible d'invoquer:

- des phénomènes limitants comme, l'absorption racinaire (K⁺),
- une participation constante dans la minéralisation globale (Ca²⁺).

Les eaux côtières montrent une contamination marine certaine mais qui se double d'un pôle de minéralisation carbonatée et sulfatée. L'examen des teneurs isotopiques semble montrer que le pôle carbonaté et le pôle sulfaté est lié à la "pollution" apportée par la canne à sucre. Cette pollution est fortement ressentie dans le lagon dont les coraux sont affectés par les apports de nitrates (Cuet *et al*, 1988).

VII.1.3.2 Etude de l'hydrodynamique.

L'interprétation des teneurs en ^{18}O a permis d'établir les zones probables d'infiltration des points d'eau ce qui met en évidence des directions d'écoulement parfois différentes des directions des coulées, comme par exemple pour certaines sources de S^t Paul. Les variations saisonnières des teneurs montrent que les aquifères réagissent souvent avec un décalage apparent de 6 mois. Certains d'entre eux montrent des temps de transit très courts avec des teneurs assimilables à celles des pluies de la saison sèche, mais dans la majorité des cas, il ne se produit pas d'infiltration pendant la saison sèche. Les teneurs en ^{14}C montrent des CITD sub-actuels. Du point de vue l'étude des teneurs en ^{13}C et ^{14}C , nous pouvons distinguer deux types de trajets souterrains pour l'étude de la côte ouest.

-Les eaux issues des circulations superficielles, pelliculaires, par rapport à la masse du strato-volcan subissent "l'influence" des pollutions de bas de versant, leurs activités en ^{14}C sont supérieures à l'activité actuelle ce qui indique des temps de transits moyens courts probablement inférieur à dix ans.

- Les eaux issues des circulations plus "profondes", isolées de la pollution de bas de versant, montrent des activités de leur ^{14}C plus faibles, inférieures à l'activité atmosphérique actuelle, ce qui semble indiquer des temps de transits plus longs, supérieurs à la dizaine d'années sans toutefois excéder 40 ans.

VII.2 METHODOLOGIE ET PERSPECTIVES

VII.2.1 Etude des pluies

L'étude des pluies a montré que l'on ne peut, dans une île à fort relief, se contenter d'un gradient altimétrique des teneurs mesurées sur une radiale. Les teneurs évoluent spatialement en fonction de l'exposition aux vents.

De même, dans le temps les gradients peuvent pratiquement disparaître, voire s'annuler.

Ceci impose, pour l'exploitation des teneurs dans les eaux souterraines, une surveillance à l'échelle des phénomènes que l'on désire mettre en évidence.

Les précipitations tropicales très intenses fournissent des signaux isotopiques remarquables que l'on peut suivre dans les sols et dans les aquifères.

Enfin, si l'on se place dans une optique paléo-hydrologique, les paléo-pluies à teneurs appauvries peuvent être interprétées de deux manières:

- soit par un épisode humide et froid (effet des températures)

- soit par un épisode chaud et humide (effet de masse) avec l'intervention de fortes "paléoperturbations" tropicales si la "paléoposition" de l'équateur météorologique le permet.

VII.2.1 Etude des sols

En ce qui concerne la méthode de Barnes et Allison (1983) pour la détermination des taux d'évaporation de nappe, elle se révèle parfaitement adaptée pour les profils courts (il suffit d'une dizaine d'analyses ^{18}O , pour la détermination d'un ordre de grandeur du flux d'évaporation d'une nappe située à 1,5 m de profondeur). Elle se marie très bien avec le bilan en chlorures qui permet d'apprécier la dynamique du phénomène évaporatoire.

Enfin , la méthode semble s'adapter assez facilement à des situations de déficit hydrique moins important (E.T.P. de la côte ouest réunionnaise =1200mm.an⁻¹) et à l'alternance saison humide - saison sèche.

En ce qui concerne les profils humides comme les profils des "hauts" la méthode semble plus incertaine et atteint probablement ses limites, malgré la situation de déficit hydrique au moment du prélèvement. Il faut ajouter que l'on connaît mal le temps d'établissement du régime permanent.

En revanche, la combinaison d'un signal isotopique prononcé dans les pluies et d'un sol très capacitif engendre un traçage naturel très net des lames d'eau lors de l'infiltration.

VII.2.3 Etude des eaux souterraines

Du fait des faibles teneurs rencontrées, l'étude de la chimie des eaux, en pays volcanique nécessite, un luxe de précautions analytiques, les pH sont "éphémères" et de manière générale, les analyses restent très délicates.

La différenciation magmatique fournit un canevas précieux pour comprendre les variations des teneurs en ions dissous dans les eaux volcaniques, mais du fait des associations minérales très variées, il est difficile d'associer les teneurs dans les eaux à des phases minérales précises.

L'outil isotopique s'est avéré très précieux pour comprendre l'origine des minéralisations en bas de pente surtout, bien entendu, pour le carbone et le soufre, qui, en pays volcanique, sont susceptibles d'être introduits dans les eaux par le biais des phénomènes périvolcaniques.

Enfin, la démarche qui consiste à étudier les cycles des éléments dans leur intégralité, par le biais de teneurs des pluies, des sols, des eaux souterraines est apparue riche d'enseignement pour la compréhension globale du cycle hydrologique dans de telles conditions.

BIBLIOGRAPHIE

- Akiti T.T., 1980
-Etude géochimique et isotopique de quelques aquifères du Ghana. Gneiss de la plaine d'Accra; calcaires de la plaine du S.E. de la Volta; granites de la haute région. Thèse Doct. Ing. ,Univ. Paris-Sud, Orsay, 232p.
- Allard P., 1978
-Composition isotopique et origine des constituants majeurs des gaz volcaniques. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris VII, 387p.
- Anonyme, 1986
-Atlas hydrogéologique de la Réunion.Doc. BRGM, 86REU30, 25p.
- Bachelery P., 1981
-Le Piton de la Fournaise (île de la Réunion). Etude volcanologique, structurale et pétrologique. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Clermont-Ferrand, 215p.
- Banton O., 1985
- Etude hydrogéologique d'un complexe alluvial en pays volcanique sous climat tropical. Site du Grand Etang (île de la Réunion).Thèse Doct. 3ème cycle, U.S.T.L., 237p.
- Bargeas A., 1984
-Apports de la simulation par modèles hydrologiques. Application à l'évaluation globale de la ressource en eau de l'île de la Réunion. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Bordeaux III, 384p.
- Barnes C.J. et Allison G.B., 1983
-The distribution of oxygen 18 and deuterium in dry soils. theory for non isothermal mouvements. J. of Hydrology, 74, 119-135.
- Bear J., 1972
-Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, Environmental Sciences Series, 757p.
- Bender M. , 1971
- Variations in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of plants in relation to the pathway of photosythetic carbon dioxide fixation. Phytochemistry, vol. 10, 1239-1244.
- Billard G., 1974
-Notice explicative de la carte géologique de l'île de la Réunion au 1:50 000. B.R.G.M. 40p.
- Black T.A., Gardner W.R. et Thurtell G.W., 1969
-The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. Soil Sci. Soc. Am., Proc., 33, 655-660.
- Blavoux B., 1978
-Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium: possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse

Doct. ès Sci., Univ. Paris VI, 333p.

Bottinga Y. et Craig H., 1969

-Oxygen isotope fractionation between CO₂ and water and the isotopic composition of marine atmosphere. Earth Planet Sci. Lett., 5, 285-295.

Bougère J. et Gopal A., 1985

-Erosion et bilan hydrique de surface (à Beaumont-S^{te}-Marie). Rapp. activité au conseil Régional, Univ. de la Réunion, 131p.

Carrère A., 1986

-Aspects climatologiques de la Réunion. Concours professionnel d'accès au grade de chef technicien de la météorologie. Météorologie Nationale. St. Denis, 90p.

Chevallier L., 1979

-Structures et évolution du volcan Piton des Neiges (île de la Réunion). Leurs relations avec les structures du bassin des Mascareignes. Océan indien occidental. Thèse Doct. 3ème cycle, U.S.M.G., 178p.

Claypool G.E., Holser W.T., Kaplan I.R. Sakai H. et Zak I., 1980

- The age curve of sulphur and oxygen isotope in marine sulphate and their mutual interpretations. Chem. Geology, 28, 199-260.

Clerc J.M., 1989

- Télédétection des émergences d'eau douce en mer sur le littoral ouest et sud de l'île de la Réunion par thermographie infra-rouge aéroportée. Thèse Doct. en Sci., U.S.T.L., sous presse.

Colin-Kaczala C., 1986

-Profils isotopiques (¹⁸O et ²H) de fluides (eau liquide, vapeur et CO₂) de la zone non saturée sous climat désertique: application à l'évaluation de l'évaporation des nappes libres du Sahara Nord-Occidental. Thèse Doct. en Sci., Univ. Paris Sud, Orsay, 171p.

Craig H., 1957

- Isotopic standard for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. Geochim. Cosmochim. Acta, vol.12, 133-149.

Craig H., 1961a

- Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen 18 in natural waters. Science, 133, 1833-1934.

Craig H., 1961b

- Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133, 1702-1703.

Craig H., Gordon L.I. and Horibe Y., 1963

- Isotopic exchange effects in the evaporation of water. Low temperature results, J. Geophys. Res. 68, 5079-5087

- Cuet P., Naim O., Faure G. et Conan J.Y., 1988
 -Nutrient-rich groundwater impact on benthic communities of la Saline fringing reef (Reunion island, Indian Ocean): preliminary results. Proc. 6th Intern. Coral Reef Congr., Townsville, Australia, in press..
- Dansgaard W. , 1964
 - Stable isotopes in precipitations. Tellus, 16, 435-468.
- Demolon A. , 1960
 - Dynamique du sol. Principes d'agronomie, tome 1, Dunod, Paris, 125p.
- Dever L., 1985
 -Approches chimiques et isotopiques des interactions fluides-matrice en zone non saturéecarbonatée. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Paris-Sud, Orsay, 196p.
- Eberschweiler C., 1986
 -Etude hydrologique, hydrochimie et géochimie isotopique d'une île volcanique sous climat tropical humide: Mayotte. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 350p.
- Filly A., 1980
 -Notice de préparation des isotopes stables. Doc. Int. Lab. d' Hydrologie et de Géochimie isotopique. Univ Paris-Sud, Orsay.
- Fontes J.Ch, 1971
 -Un ensemble destiné à la mesure de l'activité du radiocarbonate naturel par scintillation liquide. Revue Géogr. Phys. Géol. Dyn., Vol.XIII, Fasc. 4, 299-314.
- Fontes J.Ch. , 1976
 - Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles: quelques aspects. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Paris VI, 208p.
- Fontes J.Ch. , 1978
 - Hydrogéologie, un champ privilégié de l'application des isotopes du milieu: l'âge des eaux souterraines. IHES Symposium, Montpellier, Mém. hors série C.E.R.G.H., U.S.T.L., 589-590.
- Fontes J.Ch. , 1983
 - Groundwater dating. In Guide Book of Isotope Hydrology., Techn. Rep. Ser., n°91, IAEA, Vienna, 285-317
- Fontes J.Ch. , 1985
 - Some considerations on groundwater dating using environmental isotopes. In Proc. IAH 18th. Congress Hydrology in the Service of the man, vol.1, IAH, Cambridge, 118-156.
- Fontes J.Ch., Létolle R., Olive Ph. et Blavoux B., 1967
 -Oxygène 18 et tritium dans le bassin d'Evian. In "Isotopes in hydrology". Proc. Symp., IAEA, Vienne, 401-415.

- Fontes J.Ch et Olivry J.C., 1977
-Composition isotopique des précipitations de la région du Mont Cameroum. Cah. ORSTOM, série Hydrologie, 1-28.
- Fontes J.Ch. et Garnier J.M., 1976
-Correction des activités en ^{14}C du carbone dissous: estimation de la vitesse des eaux en nappes captives (résumé). C.R. Réunion Ann. Sci. Terre, 170p.
- Fontes J.Ch. et Garnier J.M., 1979
-Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach. Water resources. Res., 15, 2, 399-413.
- Fontes J.Ch. et Michelot J.L. , 1983
- Stable isotopes geochemistry in groundwater systems from Stripa site. Report 8301 (Chap. 4) SKBF-KBS, Stockholm 75-105.
- Fontes J.Ch., Yousfi M. et Allison G.B., 1986
-Estimation of long-term, diffuse groundwater discharge in the northern Sahara using stable isotope profiles in soil water. J. of Hydrology, 86, 315-327.
- Freeze A. et Cherry J. , 1979
- Groundwater. Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey, 602p.
- Friedman I. et O'Neil J.R. , 1977
- Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. In Data of geochemistry, 6ème Ed. Geological Survey Professional Paper 444KK, 106p.
- Fritz B., 1976
- Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Mém. Sci. Géol. Univ. Strasbourg, 41, 153 p.
- Fritz B. et Tardy Y. , 1973
- Etude thermodynamique du système gibbsite, quartz, kaolinite, gaz carbonique. Application à la genèse des podzols et des bauxites. Mém. Sci. Géol., Univ. Strasbourg, 26, 4, 39-367.
- Fritz P. et Fontes J.Ch., 1980
-Introduction to " Handbook of Environmental Isotope Geochemistry ". Fritz et Fontes Eds., Elsevier, vol.1, 76-138.
- Garnier J.M., 1976
-Un modèle d'estimation de l'activité initiale du carbone dissous et des vitesses d'écoulement en régime captif. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ.P. et M. Curie, 87p.
- Garrels R.M. et Christ C.L. , 1965
- Solutions, minerals, and equilibria. Harper and Row, New York, 450p.
- Gense C., 1976
-Altération des roches volcaniques basiques sur la côte orientale de Madagascar et à la Réunion. Thèse Doct. ès Sci..Inst. Géologie. Strasbourg, 176p.

- Giggenbach W, Gonfiantini R. et Panichi C, 1983
 -Geothermal systems. In Guidebook on nuclear techniques in hydrology. chap. 24. Techn. Reports Series, 91, AIEA, Vienne, 359-379.
- Glinka K.D. , 1963
 - Treatise on soil science. National science foundation. Israelprogram for scientific translations, Jérusalem, 674p.
- Godwin H., 1962
 -Half life of radiocarbon, Nature, 195-1984.
- Goldich S.S. , 1938
 - A study in rock weathering. J. Geol., 46, 17-23.
- Gouvea da sylvia rosa R., 1980
 -Migration des sels et des isotopes lourds à travers des colonnes de sédiments non saturés sous climat semi-aride. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 116p.
- Grunberger O., Coudray J. et Olek M., 1988
 -Essai de corrélation entre minéralisation des eaux souterraines et géochimie des roches dans le massif volcanique du Piton des Neiges (île de la Réunion). Hydrogéologie, n°2,12p.
- Handbook of Chemistry and physics, 1985
 -66th edition CRC PRESS, 1985-1986.
- Harned H.S. et Davis R.Jr. , 1943
 -The ionization constant of carbonic acid in water and the solubility of carbon dioxide in water and aqueous salt solutions from 0 to 50°C. J. Amer. Chem. Soc., 65, 2030-2037.
- Harned H.S. et Scholes S. R.Jr., 1941
 - The ionization constant of HCO₃⁻ from 0 to 50°C. J. Amer. Chem. Soc. , 63, 1706-1709.
- Harris K.R. et Woolf L.A., 1980
 -Pressure and temperature dependance of the self diffusion coefficient of water and oxygen 18 water. J. of Chem. Soc. Faraday Trans. i, 76, 377-385.
- I.A.E.A., 1981
 - Statistical Treatment of Environmental Isotope Data in Precipitation. Technical reports series n°206.Vienna, 255 p.
- I.A.E.A, 1986
 -Environmental isotope data n° 8. World survey of isotope concentration in precipitation (1980-1983). Technical reports series, 264, Vienne, 184 p.

- Ingerson E et Pearson F.J.Jr., 1964
-Estimation of age and rate of motion of groundwater by ^{14}C method. In Recent researches in the field of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry. Sugawara festival vol, Maruzen Co, Tokyo, 263-283.
- Join J.L., Coudray J., Pommé J.B., Daesslé M., 1987
-Comportement hydrodynamique d'une nappe côtière à l'arrière d'un lagon (La Réunion-Commune de St Paul). 87 REU 24. Serv. Géol. Reg. de l'Océan Indien, BRGM, St Denis, 54p.
- Join J.L., à paraître
-Hydrodynamique du versant ouest de l'île de la Réunion. Thèse Doct en Sciences, USTL
- Junge C.E., 1963
- Air chemistry and radioactivity. Academic Press, New York, London, 382p.
- Krouse H.R., 1980
- Sulphur isotopes in our environment. In Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Fritz et Fontes Ed.s, vol.1, Elsevier, 435-471.
- Léone G., Ricchiuto T.E. et Longinelli A., 1987
- Isotopic composition of dissolved oceanic sulphate. In studies on Sulphur Isotope Variations in Nature, AIEA, Vienne, 5-14.
- Lerman J.C. 1974
-Les isotopes du carbone ; variations de leur abondance naturelle. Application aux corrections des datations radiocarbone, à l'étude du métabolisme végétal et aux paléoclimats, Doc ès Sci., Univ. de Paris-Sud, Orsay
- Levin I., Schuchard J., Kromer B. and Muennich K.O., 1988
-The continental european suess effect (Abstract). 13th Inter. Radiocarbon Conf., Dubrovnik, Yougoslavia, June 1988.
- Longinelli A., 1988
-Oxygen-18 and sulphur 34 in dissolved oceanic sulphate and phosphate. In Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Fritz et Fontes Eds., Vol.3, The Marine Environment, Elsevier, 219-255.
- Mairine P., 1984
-Caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de nappes aquifères types de la Réunion. Rapport d'activité au conseil régional sur le programme d'hydrogéologie. Univ. La Réunion, 25-59.
- Majoube M., 1971
-Fractionnement en ^{18}O et en deutérium entre l'eau et sa vapeur. J.Chim. Phys., 68, 1423-1436.
- Météorologie Nationale
-Nombreuses publications régulières comme les bulletins climatiques mensuels (BCM), les bulletins climatiques annuels (BCA), les bulletins de saisons cycloniques, Mét. Nat., St Denis.

- Meybeck M. , 1984
-Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse Doct.ès Sci., Univ. Paris VI, Paris, 600p.
- Mezino J., 1985
-Gisement solaire de l'île de la Réunion. Thèse doct en Sci. Phys., Univ. Paris VI, 158p.
- Mizutani Y. et Rafter R.A. , 1969
- Oxygen isotopic composition of sulfates, 3-4, N. Z. J. Sci., V.12 54-59.
- Montaggioni L., 1978
-Recherches géologiques sur les complexes récifaux de l'archipel des Mascareignes (Oc. Indien Occidental), Thèse Doct. ès Sci., Univ. Aix Marseille III, 2 Vol, 217p et 43p+ill.
- Mook W.G., 1972
-On the reconstruction of the initial ^{14}C content of groundwater from the chemical and isotopic composition. Proc. 8th Int. Conf. Radiocarbon dating. Wellington, N.Z., 2, 31-41.
- Mook W.G., Bommerson J.C. et Staverman W.H., 1974
-Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. Earth Planet. Sci. Lett., 22, 169-176.
- Mook W.G., 1976
-The dissolution exchange model for groundwater with ^{14}C . In interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. Proc. symp. AIEA, Vienne, 213-225.
- Mook W.G., 1979
- On the carbon isotope fractionation during precipitation of calcium carbonate. Unpublished paper, 9p.
- Mook W.G., 1980
-Carbon14 in hydrogeological studies. In Handbook of environmental isotope geochemistry, vol.1. The terrestrial environment A, P.Fritz et J.Ch. Fontes Eds., Elsevier, 49-74.
- Nativel P., 1978
-Volcans de la Réunion. Pétrologie. Faciès zéolitique (Piton des Neiges), sublimés (La Fournaise). Thèse Doct. ès Sci., Univ. Paris Sud, Orsay, 2 volumes, 506p.
- Nicolini E., 1980
-Les isotopes du milieu dans les précipitations relevées à Antananarivo et aux stations du réseau A.I.E.A. de l'Océan Indien occidental. Application des techniques isotopiques aux nappes captives du sud-ouest de Madagascar. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris VI, 141p.

- Nicolini E., 1986
-Communication personnelle.
- Nir A. , 1967
- Development of isotope methods applies to groundwater hydrology. Amm. Geophys. Union, monographies, 11-09.
- Nydal R. et Lövseth K. , 1983
- Tracing bomb ^{14}C in the atmosphere 1962-1980. J. Geophys. Res., 88, 6, 3621-3642.
- Olsson I.U. , 1968
- Modern aspects of radiocarbon datings. Earth Sci. Rev., 4, 203-208.
- Pearson F.J. Jr. et Hanshaw B.B. , 1970
- Sources of dissolved carbonates species in groundwater and their effect on carbon 14 dating. In Isotope Hydrology. Proc. Symp. Vienne, IAEA, 271-286.
- Pedro G. , 1966
- Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles. C.R. Acad. Sci., Paris, t262, série D, 1828-1831.
- Pedro G. et Delmas A.B., 1971
- Sur l'altération expérimentale de l'olivine par lessivage à l'eau et la mise en évidence de 3 grands domaines d'évolution géologique. C.R. Acad. Sci., Paris, t273, D, 1543-1546.
- Pierre C. , 1982
- Teneurs en isotopes stables (^{18}O , ^2H , ^{13}C , ^{34}S) et conditions de genèse des évaporites marines: application à quelques milieux actuels et au Messinien de la Méditerranée. Thèse Doct. ès Sci. , Univ. Paris-Sud, Orsay, 266p.
- Philips J.R. et De Vries D.A., 1957
- Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Trans. Am. Geoph. Union, 38, 2, 222-232.
- Plummer L.N., Jones B.F. et Truesdell A.H. , 1976
- Wateq F., a fortran IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. U.S. Surv. Wat. Ressources Invest., 13, 61p.
- Rafter R.A. et Mizutani Y. , 1967
- Oxygen isotope composition of sulphates. 2. Preliminary results on oxygen isotopic variation in sulphates and relationship of their environment and to their $\delta^{34}\text{S}$ values. N. Z. J. Sci., 10, 816-822.
- Rightmire C.T., Pearson F.J., Jr. Back W., Rye R.O. and Hanshaw B.B. , 1974
- Distribution of sulphur isotopes of sulphates in groundwaters from the principal artesian aquifer of Florida and the Edwards aquifer of Texas, USA. In Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. VII, IAEA, Vienne, 191-207.

- Righthire C.T. , 1978
- Seasonal variation in $p\text{CO}_2$ et ^{13}C contents of soil atmosphere. Water Resources Res., 14, 4, 691-692.
- Robert R., 1974
-Morphologie littorale de l'île de la Réunion. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paul Valéry Montpellier III, 183p.
- Robert R., 1986
-Géographie de l'eau à l'île de la Réunion. Essai de distribution régionale de l'alimentation et de l'écoulement. Thèse Doct. es Lettres, Univ. Paul Valéry Montpellier III, 2 tomes, 471p.
- Rocher P., 1988
-Contexte volcanique et structural de l'hydrothermalisme récent dans le massif du Piton des Neiges. Ile de la Réunion. Thèse Doct. en Sciences, Univ. Paris-Sud, Orsay, 443p.
- Rodier J., 1984
- L'analyse de l'eau. Bordas, Paris, 1365p.
- Rosello V., 1984
-Les sols bruns des Hauts (île de la Réunion). Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris VII, 200p.
- Saliege J.F., 1979
-Détermination expérimentale du fractionnement isotopique $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ au cours des processus naturels.Mém.Ing. CNAM, 76p.
- Saliège J.F. et Fontes J.Ch. , 1983
- Essai de détermination expérimentale du fractionnement des isotopes ^{13}C et ^{14}C du carbone au cours des processus naturels. Inter. J. of Appl. Rad. and Isot. Vol.35, N°1, 55-62.
- Schoeller H., 1962
-Les eaux souterraines. Masson et cie, Paris, 642p.
- Sieffermann G., 1973
-Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse Univ. Strasbourg, mém. ORSTOM n°66, 183p.
- Stuiver M. et Polach H.A. , 1977
- Discussion reporting of ^{14}C data. Radiocarbon. Vol.19, N°3, 355-363.
- Stumm W. et Morgan J.J. , 1981
- Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. J.Wiley and sons, New York, 583p.
- Suess H. , 1971
- Climatic changes and the atmospheric radiocarbon. Paleogeo. Paleoclim. Paleoeco., 10, 199-202.

- Tamers M.A., 1975
-Validity of radiocarbon dates on groundwater. Geophys. Surv., 2, 217-239.
- Tardy Y. , 1969
-Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Doct. ès Sci., Univ. L.Pasteur, Strasbourg, 199p.
- Taylor B.E., Wheeler M.C. et Nordstrom D.K. , 1984
- Isotope composition of sulphate in acid mine drainage as measure of bacterial oxidation. Nature ,308, pp 538-541.
- Touchebeuf de Lussigny P., 1960
-Recherches d'eau souterraine dans la région sous le vent de l'île de la Réunion. 6èmes journées de l'Hydraulique, Nancy, III, 10, 7p.
- Unterweger M.P., Coursey B.M., Shima F.J. et Mann W.B. , 1980
- Preparation and calibration of the 1978 National Bureau of Standards tritiated water standards. Inter. J. of Appl. Rad. and Isot., 31; 10, 611-614.
- Vaksmann M., 1987
-Etude du fonctionnement hydrique des andosols et des sols andiques de l'île de la Réunion. Thèse de Doct. en Sciences, U.S.T.L., 171p.
- Van Everdingen R.O. et Krouse H.R. ,1985
- Isotope composition of sulphate generated by bacterial and biological oxidation. Nature ,315, 395-396.
- Vogel J.C., 1970
-Carbon of dating of groundwater. In Isotope in hydrology 1970. Proc. Symp. AIEA, Vienne, 225-239.
- Wackermann J.M., 1980
-Modèles décrivant les variations de teneurs dans les arènes d'altération météorique tropicale et les nappes afférentes. Sci. de la Terre, série informatique géologique, n°14, 26ème C.G.I., Paris, 201-217.
- Wackermann J.M., 1981
-Une méthode de calcul de la composition des eaux d'arènes météoriques basée sur leur conductivité électrique. Ist. UEG Meeting, Strasbourg, et Terra cognita, 1:122-123.
- Wackermann J.M. et Tremblay P., 1982
-Un programme de calcul permettant la détermination des minéraux en cours de dissolution et en voie de formation à partir de la composition chimique des eaux d'arènes météoriques. Cah. ORSTOM, sér. Géol., XII, 1, 91-100.
- Wackermann J.M., à paraître
-Propriétés électroniques des solutions aqueuses. Application aux phénomènes de dissolution et de cristallisation.

- Wada K., 1982
-Amorphous clay minerals. Chemical composition, crystalline state, synthesis, and surface properties. Intern. Clay Conf., Van Olphen H. et Veniale F. ed., Elsevier, 385-398.
- Yousfi M., 1984
-Etude géochimique et isotopique de l'évaporation et de l'infiltration en zone non saturée sous climat aride: Béni Abbès, Algérie. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 228p.
- Yurtsever Y. et Gat J.R. , 1981
- Atmospheric waters, in Stable Isotope Hydrology. Technical reports series n°210, A.I.E.A., Vienne, 103-142.
- Zouari K., 1983
-Etude isotopique et géochimique de l'infiltration naturelle en zone non saturée sous climat semi-aride (sud Tunisie). Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 153p.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

- An.1: Petite histoire de l'île de la Réunion
- An.2 : Petit descriptif de la géographie humaine actuelle de l'île de la Réunion
- An.3: Situation du profil de S^t Gilles-Kaufmant.
- An.4: Teneurs isotopiques mesurées à S^t Gilles-Kaufmant et modélisation de l'évaporation . L'hypothèse choisie est le transfert mixte isotherme.
- An.5: Teneurs en chlorures mesurées à S^t Gilles-Kaufmant et bilan de masse des chlorures dans le profil.
- An.6: Situation du profil de S^t Paul.
- An.7: Teneurs isotopiques mesurées à S^t Paul et modélisation de l'évaporation . L'hypothèse choisie est l'anisothermie du profil.
- An.8: Teneurs en chlorures mesurées à S^t Paul et bilan de masse des chlorures dans le profil.
- An.9: Situation du profil d' Etang Salé.
- An.10: Teneurs isotopiques mesurées à Etang Salé et modélisation de l'évaporation. L'hypothèse choisie est le transfert mixte isotherme.
- An.11: Teneurs en chlorures mesurées à Etang Salé et bilan de masse des chlorures dans le profil.
- An.12: Situation du profil de Trois Bassins.
- An.13: Principales caractéristiques hydrodynamiques du sol de Trois Bassins (*in* Vaksman,1987).
- An.14: Teneurs isotopiques mesurées et modélisation de l'évaporation à Trois Bassins. Hypothèse du transfert mixte isotherme.
- An.15: Modélisation de l'évaporation à Trois Bassins selon l'hypothèse du transfert sous forme liquide.
- An.16: Situation du profil de Beaumont.
- An.17: Teneurs isotopiques mesurées et modélisation de l'évaporation à Beaumont. Hypothèse du transfert mixte isotherme.
- An.18: Modélisation de l'évaporation à Beaumont selon l'hypothèse du transfert sous forme liquide.

- An.19: Situation du profil de La Montagne.
- An.20: Teneurs isotopiques mesurées et modélisation de l'évaporation à La Montagne. Hypothèse du transfert mixte isotherme.
- An.21: Modélisation de l'évaporation à La Montagne selon l'hypothèse du transfert sous forme liquide.
- An.22: Situation du profil de Grand Etang;
- An.23: Teneurs en ^{18}O dans l'eau du sol de Grand Etang .
- An.24: Teneurs en ions chlorures dans l'eau des sols des Hauts.
- An.25: Points d'eaux visités pendant les campagnes d'échantillonnages, altitudes, codes B.S.S., dénominations, situations.
- An.26: Résultats des analyses des eaux éloignées de l'océan en saison sèche 1986 (millimoles par litre).
- An.27: Résultats des analyses des eaux éloignées de l'océan pendant la saison sèche 1986 (milliéquivalents par litre).
- An.28: Résultats des analyses partielles des eaux éloignées de l'océan pendant la saison humide 1985-1986 (millimoles par litre).
- An.29: Résultats des analyses partielles des eaux éloignées de l'océan pendant la saison humide 1985-1986 (milliéquivalents par litre).
- An.30: Pourcentages cationiques et anioniques des teneurs en milliéquivalents par litre des eaux éloignées de l'océan.- saison sèche 1986-
- An.31: Pourcentages cationiques et anioniques des teneurs en milliéquivalents par litre des eaux éloignées de l'océan.- saison humide 1985/1986- analyses partielles-
- An.32: Résultats des analyses partielles des eaux proches de l'océan pendant la saison sèche 1986 (millimoles par litre).
- An.33: Résultats des analyses partielles des eaux proches de l'océan pendant la saison sèche 1986 (milliéquivalents par litre).
- An.34: Teneurs en ^{18}O et ^2H des eaux souterraines prélevées en fin de saison sèche 1986.
- An.35: Facteurs de fractionnement du ^{13}C entre Le CO_2 (gaz) et le CITD à l'équilibre isotopique pour différents pH et températures.

An.1: Petite histoire de l'île de la Réunion

Aperçue dès le 2^e millénaire par des marins arabes, la Réunion nommée successivement Dina Margabin, Santa Appolonia, Mascarin, est visitée par de nombreux navigateurs (anglais, portugais, hollandais) qui la décrivent comme un paradis (beauté des paysages, luxuriance de la végétation, abondance de la faune). En 1640 les français en prennent possession au nom du roi de France, possession symbolique l'île restant vierge de tout habitant. En 1646 elle devient un lieu de déportation pour des révoltés de la Grande Ile (Madagascar).

En 1665 sous l'initiative de Colbert et sous la direction de la compagnie des Indes, l'île Bourbon (de son nouveau nom) accueille ses premiers colons qui y vivront dans l'anarchie la plus totale jusqu'en 1717, date à laquelle la Compagnie des Indes décide la mise en valeur de l'île en développant la culture des caféiers. Ceci entraîne une déportation d'esclaves de Madagascar et d'Afrique. De nouveaux colons s'installent attirés par la prospérité de l'île. En 1767 la Compagnie des Indes est supprimée et l'administration royale gère l'île. Une diversification de l'agriculture est lancée pour subvenir à ses besoins et pour fournir des vivres à l'île de France (Maurice) et aux navires en escale.

La Révolution laisse peu de trace si ce n'est son nom Réunion. Dans cette 2^e moitié du 18^{ème} siècle, on assiste à une prolétarianisation des blancs due à l'accroissement de la population et aux morcellements des terres. Ne voulant pas se reconvertir aux côtés des esclaves comme ouvriers agricoles sur les grands domaines ou comme artisans, les petits cultivateurs se réfugient dans les Hauts vivant de cueillette, de pêche, de chasse et de rapine; leurs vies ressemblant à celles des esclaves marrons. Sous Bonaparte qui lui donne aussi son nom, une catastrophe climatique s'abat sur l'île : en un an, une succession de cyclones et d'avalanches détruit une grande partie des récoltes et "envoie le sol à la mer". La famine s'installe pendant plusieurs mois, l'île étant en état de blocus à cause de la guerre des Indes.

En 1810 les anglais occupent l'île jusqu'en 1814 date à laquelle elle est rendue à la France en même temps que l'île de France est annexée par l'Angleterre sous le nom de Maurice. De ce fait

Bourbon est libérée de la tutelle de l'île de France : elle va pouvoir s'organiser sans être sacrifiée aux besoins de l'île soeur. Le commerce entre les deux îles s'interrompt, l'île perd son exportation de vivres donc repense son économie en se lançant dans la culture de la canne à sucre. Cette culture se fait au détriment des autres cultures, couvre les bonnes terres du littoral et tend à faire de grandes propriétés.

En 1848 l'abolition de l'esclavage se fait sans heurt, les anciens esclaves travaillant pour leurs anciens maîtres.

En 1850 la Réunion est une colonie en pleine expansion grâce à l'essor de la canne: de grands travaux sont effectués (routes, port de Saint-Pierre); l'activité intellectuelle est très développée. La main d'oeuvre est recrutée à Madagascar, aux Comores en Afrique, en Inde et à Rodrigues.

En 1863 la Réunion entame son déclin pour des raisons :

-économique : la monoculture sucrière à la merci des cours subit la concurrence du sucre de betteraves, épuise le sol et utilise une industrie précaire.

-sociale : prolétarisation des petits blancs et affranchis , alcoolisme

-géographique et politique : intérêt de la France pour Madagascar à son détriment , percement du canal de Suez détournant la Réunion de la route des Indes.

Les réunionnais font de sérieux efforts pour sortir leur pays de la crise : ils développent la culture de la vanille et la production d'huiles essentielles et construisent le chemin de fer et le port de la pointe des Galets. De 1860 à 1870 on assiste à une immigration de chinois qui se lancent dans le commerce de détail et d'alimentation en villes et dans les hauts puis d'indiens musulmans qui s'installent comme tailleurs pour devenir commerçants de bazar et tissu.

La guerre 14-18 permet une tentative de redressement. En effet les capitaux tirés du commerce avec la France (besoins de sucre et de marchandises) servent à moderniser l'économie en recherchant l'amélioration du rendement aux champs et à l'usine et en démantelant les grands domaines.

En 1945 la situation est grave : misère , maladie , analphabétisme , retard technique , infrastructures inadaptées ; rien ne correspond aux nécessités d'une économie moderne. Les réunionnais n'ont connu que le régime colonial; la population peut se diviser en deux d'un coté l'élite aisée (qq. familles) de l'autre les pauvres (petits blancs, indiens, africains) représentant 80% de la population.

La départementalisation qui correspond bien à l'idéal républicain de la libération s'établit en 1946. L'introduction des services extérieurs, la création d'entreprises, le développement du commerce font apparaître une nouvelle classe : la moyenne bourgeoisie et une nouvelle ethnie : les z'oreils ,métropolitains peu intégrés à la société créole car de passage.

La départementalisation essaye de :

- donner à l'île une infrastructure de pays neuf en mettant en oeuvre un programme de grands travaux (routes, port, liaison aérienne, électrification).

-rénover l'économie en redressant la production des cultures traditionnelles d'exportation (sucre , vanille ,géranium) et en développant les cultures vivrières , l'élevage , le tourisme et l'industrie.

-rendre le niveau de vie de réunionnais semblable à celui des métropolitains (création d'un S.M.I.G.réunionnais, augmentation des salaires).

-lutter en matière de santé (A.M.G. , P.M.I. , hôpitaux ,cantines scolaires) et de logement (H.L.M. ,L.T.S.)

-former et éduquer les jeunes (construction d'écoles)

En 1982 la décentralisation donne naissance à la région qui a la vocation de préparer le long terme en matière de développement économique, d'aménagement du territoire , d'éducation , de recherche , de culture , de communication et de qualité de vie.Elle donnera une certaine cohérence dans l'aménagement de l'île.

An.2 : Petit descriptif de la géographie humaine actuelle de l'île de la Réunion

Densité de population , activités économiques et infrastructures se répartissent inégalement sur l'ensemble insulaire. Trois types de régions peuvent se distinguer :

1) les régions urbanisées et sucrières du littoral:

Elles concentrent les moyens de production , le commerce , les équipements et les services par conséquent abritent un fort % de population.

-Au nord , Saint-Denis , capitale politique et économique

(110000 hab. en 1982) concentre la moitié des emplois industriels et tertiaires. Une exurbanisation se développe aux alentours en accueillant les services décentralisés , des entrepôts et des petites entreprises.

-Au nord-ouest , Le Port (30000 hab. en 82) est l'antenne commerciale grâce à l'activité du port de la Pointe des Galets. Il s'y développe de grandes Z.I et parallèlement une population prolétarienne.

-Au nord-est sont implantées de petites villes comme Saint-Benoit (7000 hab. en 82) et Saint-André (15000 hab. en 82) autour desquelles l'activité économique est essentiellement agricole. La dominance de la canne à sucre sans équivoque n'exclut pas la production de vanille et de cultures maraîchères et fruitières.

-Au sud, Saint-Pierre (22000 hab. en 82) joue bien son rôle de sous-préfecture au niveau administratif et commercial ; la ville est dotée d'un hôpital très moderne. Son arrière-pays abrite une agriculture diversifiée. On trouve des petites villes , du coté ouest Saint-Louis

(1000 hab. en 82) , du coté est Saint-Joseph.

-A l'ouest , Saint-Paul est une ville peu active par rapport au Port ou à Saint-Denis. La culture de la canne y est dominante . La commune (80000hab. en 82) revêt un intérêt touristique avec Saint-Gilles , station balnéaire en pleine expansion : résidences , hôtels pour le tourisme international ; V.V.F. , camping , infrastructure pour le tourisme local.

2) les régions rurales de polyculture mixte des pentes externes des deux massifs volcaniques :

Les pentes externes orientales sont peu aménagées par l'homme : la canne monte jusqu'à 400 -500 m. d'altitude cédant ensuite à la forêt.

Différemment sur les pentes d'ouest et du sud , à partir de 600 m. , la culture de la canne s'intègre avant de disparaître dans une polyculture mixte associant cultures des plantes à parfum pour l'exportation , cultures céréalières (maïs) , maraîchères , fruitières et élevage pour le marché local :

-Dans les hauts de l'ouest : culture du géranium

-Dans les hauts du Tampon : culture diversifiée , élevage sur prairies naturelles ou artificielles ,zone de résidences secondaires (plaine des Cafres)

-Dans les hauts de Montvert , de Petite Ile , de Saint-Joseph : culture du vétiver.

La densité de la population diminue en fonction de l'élévation de l'altitude.

3)Les régions rurales de polyculture vivrière des hauts de l'interieur :

Peu peuplées (15000 hab. en 82) , ces régions sont encore isolées malgré le développement des infrastructures ayant pour but de faciliter l'économie marchande et le tourisme rural. Ces 3% de la population se répartissent dans les îlets des trois cirques et à la plaine des Palmistes. Les espaces des hauts ont chacun leurs caractéristiques :

-Le cirque de Salazie est le plus peuplé , le plus riche et le plus ouvert. On cultive la canne et des cultures maraîchères dont le surplus est écoulé sur le marché littoral.

-Le cirque de Cilaos est plus sec et plus pauvre . Des activités de renommée locale sont pratiquées : culture des lentilles , de la vigne ,broderie artisanale , exploitation des sources

thermales.

-Le cirque de Mafate subit à cause de son enclavement un dépeuplement certain (500hab. en 82).

-La plaine des Palmistes (2000 hab. en 82)est une zone d'élevage et de villégiature.

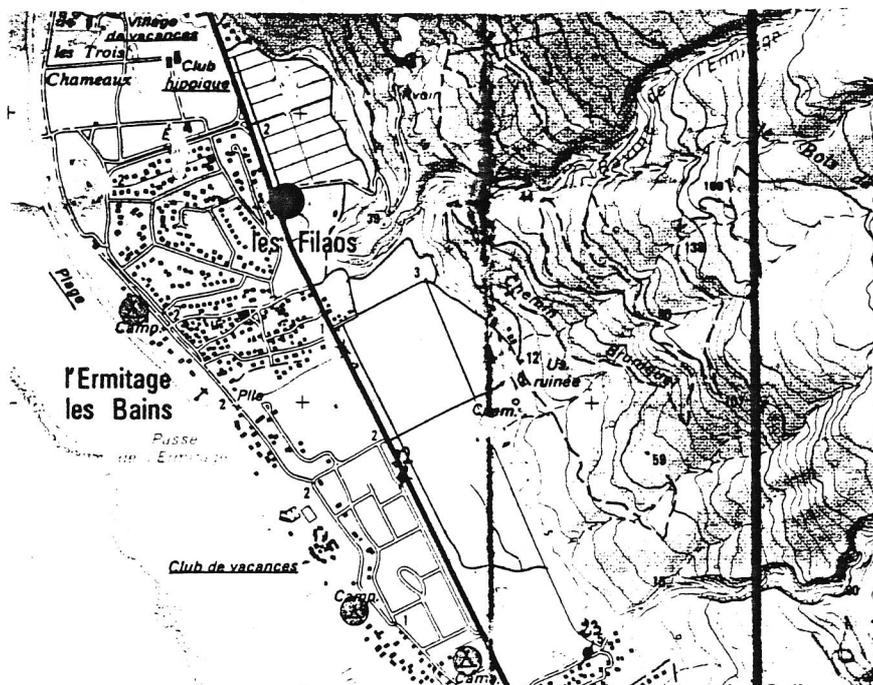
On observe donc une disparité socio-spatiale au profit des espaces cotiers au détriment des hauts.Saint-Denis , courroie de transmission entre l'île et la métropole exerce sa dominance sur l'ensemble de l'île.

PROFIL DE ST GILLES

An.3: Situation du profil de St Gilles-Kaufmant.



NORD



CARTE DE SITUATION

echelle: 1/25000

VALEURS MESUREES ET CALAGE DU MODELE				
profondeurs (cm)	TENEURS EN OX.18 pour mille vs smow	fonction de calage f(z)	Teneurs réduites	Log des teneurs réduites
7,5	3,47	0,042	1,000	0,000
15,0	0,65	0,089	0,697	-0,361
30,0	-1,82	0,182	0,431	-0,841
45,0	-2,33	0,276	0,376	-0,977
55,0	-3,33	0,338	0,269	-1,314
68,5	-4,97	0,422	0,092	-2,381
95,0	-5,83	0,586	0,000	
107,5	-5,76	0,664	0,008	
125,0	-5,80	0,733	0,003	

REGRESSION LOGARITHMIQUE DE CALAGE DU MODELE	
LN(Delta T)=	-5,4078792 F(Z) + 0,2362353371

DROITE DE REGRESSION	F(Z)	régression sur les teneurs volumiques en eau	
PENTE	0,006218704	FACTEUR DE PUISSANCE	1,0089
ORIGINE	-0,004329621	ORIGINE	0,0489
E= 33 mm			

EXTRAPOLATIONS ET RESTITUTION DU MODELE					
PROFONDEURS en cm	teneurs volumiques en eau	FONCTION de calage f(z)	ln(teneurs normalisées)	teneurs normalisées	teneurs δ pourmille
5	0,059	0,009	0,187	1,206	5,38
10	0,059	0,044	-0,003	0,997	3,44
15	0,0615	0,079	-0,192	0,825	1,84
20	0,068	0,113	-0,374	0,688	0,57
25	0,074	0,146	-0,552	0,576	-0,47
30	0,0745	0,178	-0,728	0,483	-1,34
35	0,069	0,212	-0,910	0,403	-2,09
40	0,064	0,246	-1,096	0,334	-2,72
45	0,062	0,281	-1,284	0,277	-3,26
50	0,063	0,316	-1,472	0,230	-3,70
55	0,067	0,350	-1,655	0,191	-4,05
70	0,081	0,446	-2,177	0,113	-4,78
75	0,082	0,478	-2,347	0,096	-4,94
80	0,0835	0,509	-2,516	0,081	-5,08
85	0,084	0,540	-2,684	0,068	-5,20
90	0,089	0,570	-2,849	0,058	-5,29
95	0,096	0,600	-3,008	0,049	-5,37
100	0,104	0,628	-3,162	0,042	-5,44
105	0,114	0,656	-3,309	0,037	-5,49
110	0,126	0,681	-3,449	0,032	-5,53
115	0,14	0,706	-3,582	0,028	-5,57
120	0,162	0,729	-3,704	0,025	-5,60
125	0,193	0,749	-3,815		
130	0,25	0,766	-3,906		

moyenne 0,097

An.4: Teneurs isotopiques mesurées à St Gilles-Kaufmant et modélisation de l'évaporation
L'hypothèse choisie est le transfert mixte isotherme.

VALEURS MESUREES	
PROF. cm	teneur en Cl meq. par litre
0	17,94
35	8,09
55	4,27
65	5,14
75	3,04
95	2,40
125	2,65
140	2,95

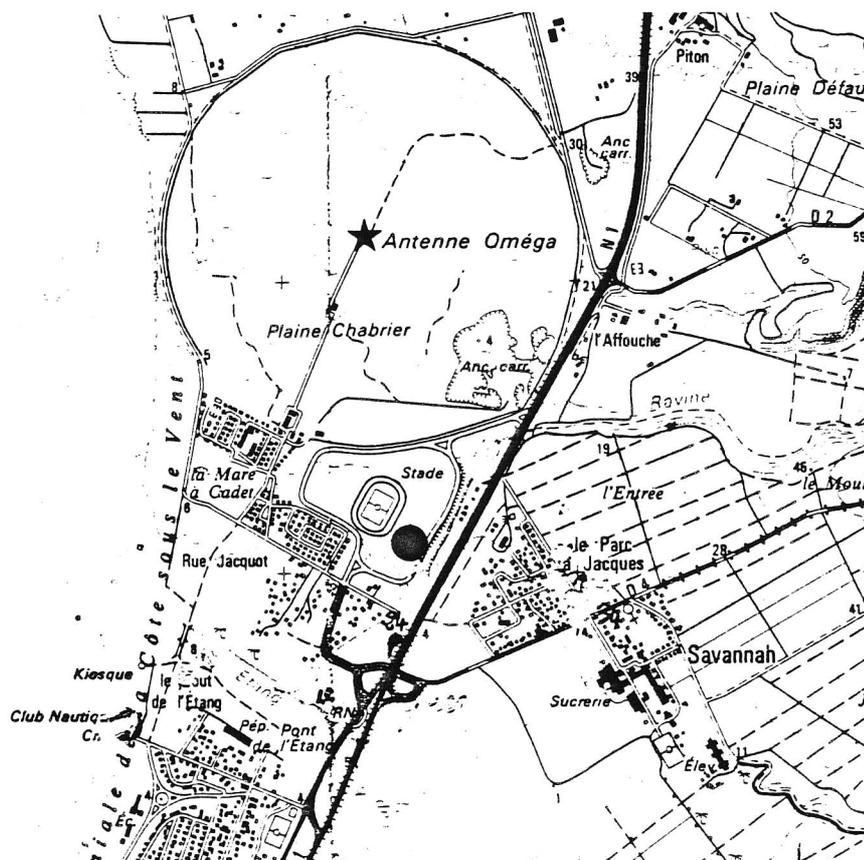
EXTRAPOLATIONS ET BILAN PAR TRANCHE			
profondeur en cm	teneur en eau volumique	teneur en Cl- meq. par litre	meq par tranche de sol
0	0,059	17,95	52,94
5	0,059	16,50	48,68
10	0,059	15,00	44,25
15	0,062	13,65	41,97
20	0,068	12,20	41,48
25	0,074	10,70	39,59
30	0,075	9,40	35,02
35	0,069	8,00	27,60
40	0,064	7,00	22,40
45	0,062	6,10	18,91
50	0,063	5,20	16,38
55	0,067	4,30	14,41
60	0,070	4,60	16,10
65	0,075	5,10	19,13
70	0,081	4,15	16,81
75	0,082	3,10	12,71
80	0,084	2,90	12,11
85	0,084	2,75	11,55
90	0,089	2,60	11,57
95	0,096	2,40	11,52
100	0,104	2,41	12,53
105	0,114	2,50	14,25
110	0,126	2,55	16,07
115	0,140	2,60	18,20
120	0,162	2,70	21,87
125	0,193	2,80	27,02
130	0,250	2,80	35,00

total = 660,4 meq par mètre carré

An.5: Teneurs en chlorures mesurées à St Gilles-Kaufmant et bilan de masse des chlorures dans le profil.

PROFIL DE ST PAUL

An.6: Situation du profil de St Paul.



↑
NORD

CARTE DE SITUATION

echelle: 1/25000

MODELE ANISOTHERMIQUE A ST PAUL

profondeurs en cm	Teneurs OX. 18 pour mille	Temp. °celcius
7,5	-0,73	50,00
12,5	-1,07	44,47
17,5	-2,53	40,16
22,5	-3,78	36,80
27,5	-4,80	34,19
32,5	-5,61	32,16
37,5	-6,22	30,57
42,5	-6,67	29,34
47,5	-7,01	28,38
52,5	-7,21	27,63
57,5	-7,33	27,05
62,5	-7,41	26,59
67,5	-7,41	26,24
72,5	-7,41	25,96
77,5	-7,33	25,75
82,5	-7,25	25,58
87,5	-7,17	25,45
92,5	-7,06	25,35
97,5	-6,96	25,27
102,5	-6,87	25,21
107,5	-6,74	25,16
112,5	-6,66	25,13
117,5	-6,54	25,10
122,5	-6,48	25,07
127,5	-6,38	25,06
132,5	-6,28	25,04
137,5	-6,19	25,03
142,5	-6,11	25,02
147,5	-6,03	25,02
152,5	-5,96	25,01
157,5	-5,89	25,01
162,5	-5,83	25,01
167,5	-5,77	25,00
172,5	-5,72	25,00
177,5	-5,66	25,00
182,5	-5,62	25,00

EVAPORATION CALCULEE

moyenne des teneurs	0,04752
Z de V=	0,7m
Zv/zT=	1
Porosité	0,35
dv=	0,0000264
dl=	3E-09
Tortuosité	0,67
Nsat	0,0304
section de diffusion	0,303
densité	1000

$$E = N_{sat} \cdot s_d \cdot 0,67 \cdot dv / d$$

2,32E-10 M.S-1

soit **7,3 mm par an**

VALEURS MESUREES

profondeurs en cm	teneurs en ∂ pour mille	teneurs pondérales	densités humides	teneurs volumiques
2,5	-6,83	0,037	1,390	0,051
7,5	-0,73	0,034	1,130	0,038
25	-5,36	0,025	1,618	0,040
45	-7,55	0,022	1,728	0,038
70	-7,47	0,029	1,875	0,054
110	-6,68	0,025	1,674	0,042
140	-6,82	0,03	1,314	0,039
150	-5,74	0,035	1,781	0,062
180	-4,99	0,035	1,774	0,062

An.7: Teneurs isotopiques mesurées à St Paul et modélisation de l'évaporation

L'hypothèse choisie est l'anisothermie du profil.

VALEURS MESUREES		
profondeur cm	teneur en eau volumique	teneur en CL- meq. par litre
10	0,040	8,13
25	0,040	3,79
50	0,038	3,11
70	0,054	2,01
80	0,045	2,07
95	0,042	2,42

EXTRAPOLATIONS ET BILAN PAR TRANCHE			
profondeur cm	teneur en eau volumique	teneur en Cl- meq. par litre	Cl- en meq par tranche
0	0,040	8,20	16,40
5	0,040	8,20	16,40
10	0,040	8,13	16,26
15	0,040	6,50	13,00
20	0,040	5,20	10,40
25	0,040	3,90	7,80
30	0,040	3,60	7,20
35	0,039	3,50	6,83
40	0,039	3,40	6,63
45	0,038	3,10	5,89
50	0,038	3,00	5,70
55	0,042	2,80	5,88
60	0,046	2,50	5,75
65	0,050	2,20	5,50
70	0,054	2,00	5,40
75	0,052	2,00	5,20
80	0,050	2,00	5,00
85	0,042	2,20	4,62
90	0,040	2,20	4,40
95	0,038	2,40	4,56

au total 158,82 meq. par mètre carré

si la nappe est à trois mètres avec une teneur de
il faut rajouter 264 meq jusqu'à la nappe soit

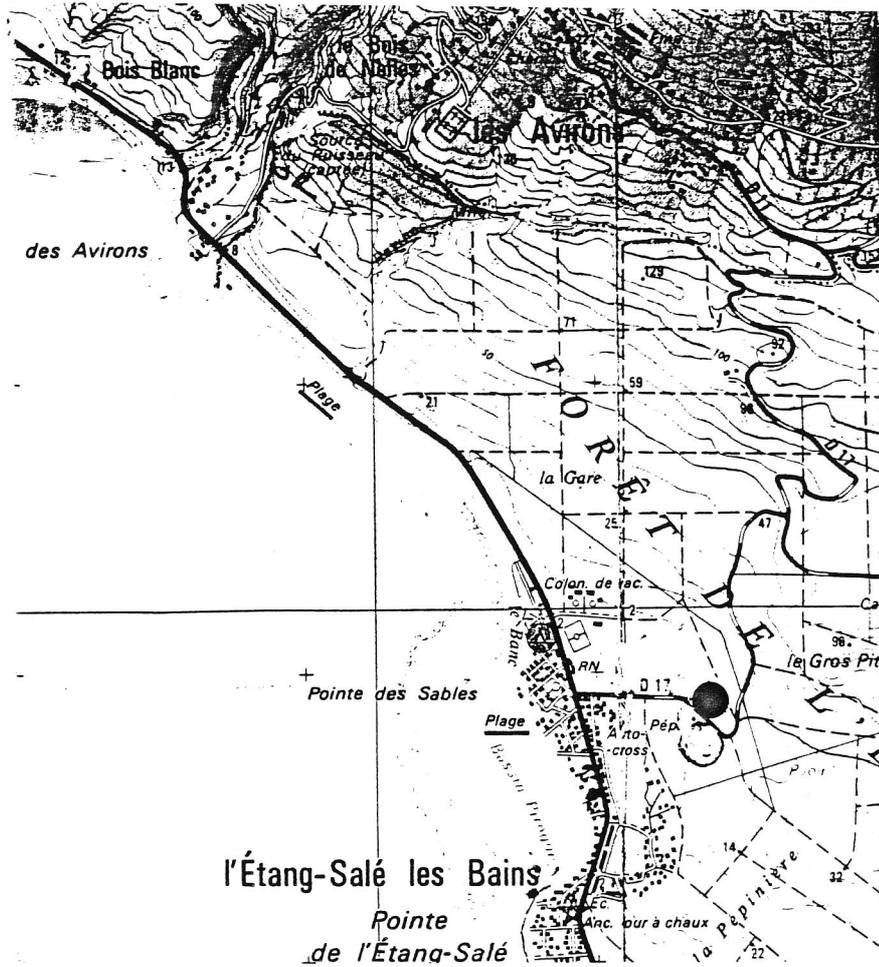
88 meq. par mètre cube

423 meq. par mètre carré

An.8: Teneurs en chlorures mesurées à St Paul et bilan de
masse des chlorures dans le profil.

PROFIL DE ETANG SALE

An.9: Situation du profil d' Etang Salé.



CARTE DE SITUATION

echelle:1/25000

VALEURS MESUREES ET CALAGE DU MODELE

prof. cm	teneurs volumiques en eau	teneurs en oxygène 18 pour mille vs smow	teneurs normalisées	fonction de calage f(Z)	ln(teneurs normalisées)
2,5	0,033	3,79	1,000	0,030	0,000
7,5	0,030	2,28	0,847	0,046	-0,167
12,5	0,021	0,37	0,652	0,062	-0,427
17,5	0,021	-0,39	0,575	0,079	-0,553
34,0	0,051	-0,48	0,566	0,182	-1,901
49,0	0,042	-4,58	0,149	0,251	
70,0	0,056	-4,42	0,166	0,349	
100,0	0,348	-6,05	0,000		

droite de régression de F(z) en fonction de Z z <70cm
 $F(z) = 0,003275428 * Z \text{ en cm} + 0,02123892$

droite de régression de calage du modèle
 $\ln(\delta t) = -12,55346 * f(Z) \text{ en S.I.} + 0,39083782$
E = 70 mm

VALEURS EXTRAPOLEES ET MODELISATION

prof. en cm	teneurs volumiques en eau	fonction calage f(z)	ln(delta)	teneurs normalisées	teneurs en δ pour mille
2,5	0,032	0,000	0,000	0,000	3,79
7,5	0,031	0,035	-0,043	0,958	3,38
12,5	0,025	0,053	-0,268	0,765	1,47
17,5	0,021	0,071	-0,500	0,606	-0,08
22,5	0,023	0,089	-0,729	0,482	-1,30
27,5	0,032	0,106	-0,945	0,389	-2,22
32,5	0,042	0,123	-1,148	0,317	-2,93
37,5	0,050	0,138	-1,341	0,261	-3,48
42,5	0,047	0,154	-1,539	0,215	-3,94
47,5	0,042	0,170	-1,742	0,175	-4,33
52,5	0,042	0,186	-1,945	0,143	-4,64
57,5	0,046	0,202	-2,143	0,117	-4,90
62,5	0,050	0,213	-2,280	0,102	-5,04
67,5	0,063	0,232	-2,517	0,081	-5,26
72,5	0,055	0,247	-2,706	0,067	-5,39
77,5	0,075	0,260	-2,876	0,056	-5,50
82,5	0,120	0,271	-3,014	0,049	-5,57
87,5	0,180	0,280	-3,126	0,044	-5,62
92,5	0,240				
97,5	0,290				
102,5	0,348				
moyenne	0,088				

An.10: Teneurs isotopiques mesurées à Etang Salé et modélisation de l'évaporation.

L'hypothèse choisie est le transfert mixte isotherme.

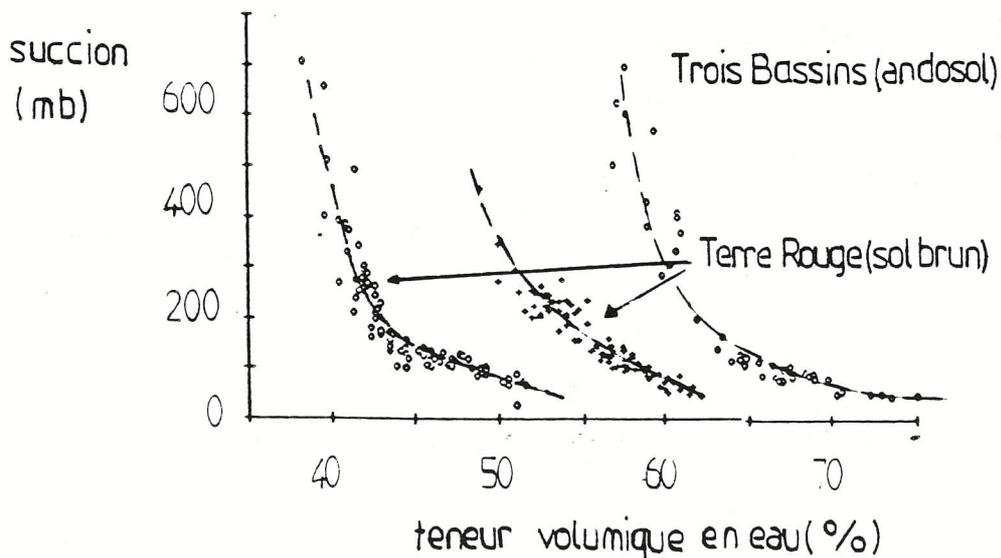
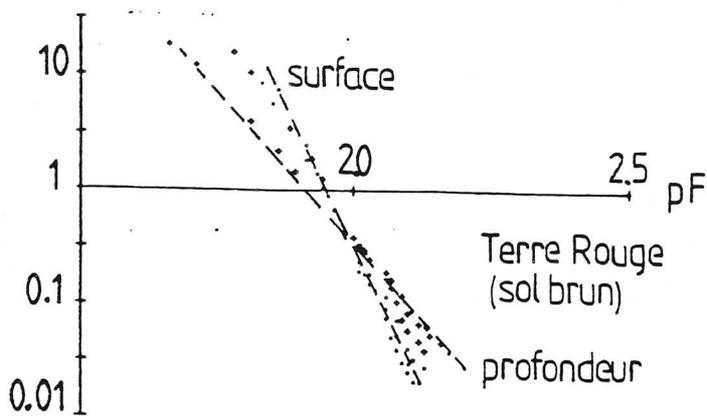
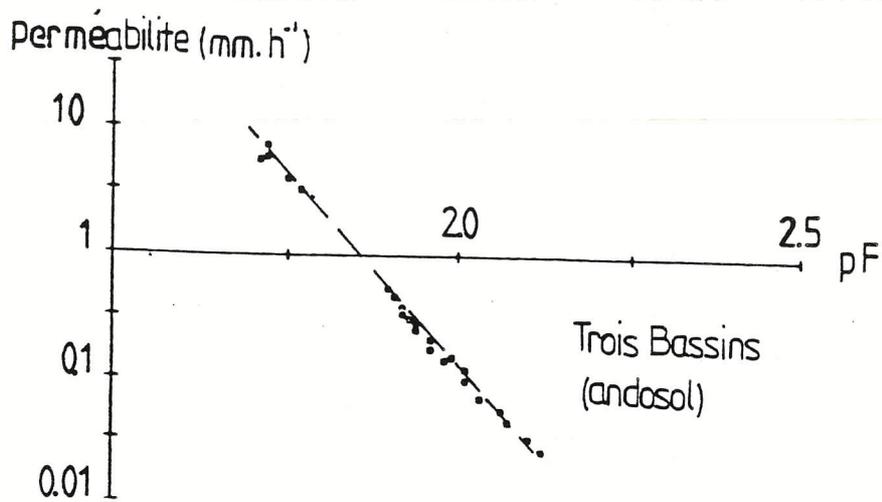
VALEURS MESUREES		
prof. (cm)	humidités volumiques	Cl- meq.par litre
2,5	0,032	515,3
7,5	0,031	442,1
12,5	0,025	373,7
17,5	0,021	246,8
32,5	0,042	54,2
52,5	0,042	31,1
67,5	0,063	17,4
102,5	0,348	12,2

EXTRAPOLATIONS ET BILAN PAR TRANCHE

Prof. cm	humidités volumiques	Cl- meq. par litre	Cl-par tranche
2,5	0,032	515,3	824,5
7,5	0,031	442,1	685,3
12,5	0,025	373,7	467,1
17,5	0,021	246,8	259,1
22,5	0,023	182,6	210,0
27,5	0,032	118,4	189,4
32,5	0,042	54,2	113,8
37,5	0,050	48,4	121,0
42,5	0,047	42,7	100,3
47,5	0,042	36,9	77,5
52,5	0,042	31,1	65,3
57,5	0,046	26,5	61,0
62,5	0,050	22	55,0
67,5	0,063	17,4	54,8
72,5	0,055	16,7	45,9
77,5	0,075	15,9	59,6
82,5	0,120	15,2	91,2
87,5	0,180	14,43	129,9
92,5	0,240	13,7	164,4
97,5	0,290	12,9	187,1
102,5	0,348	12,2	212,3

total 4174,5 par mètre carré

An.11: Teneurs en chlorures mesurées à Etang Salé et bilan de masse des chlorures dans le profil.



An.13: Principales caractéristiques hydrodynamiques du sol de Trois Bassins (in Vaksman, 1987).

VALEURS MESUREES

profondeurs cm	teneurs 18O δ pour mille	teneurs pondérales	densités humides	humidités volumiques
5	-5,46	0,36	1,02	0,368
15	-6,44	0,29	1,36	0,396
30	-7,21	0,32	1,32	0,423
47,5	-8,48	0,28	1,37	0,384
67,5	-9,48	0,37	1,23	0,456
87,5	-11,11	0,38	1,17	0,440
105	-7,27	0,57	1,14	0,648
125	-7,64	0,54	1,07	0,579
170	-6,67	0,58	1,16	0,672
195	-7,11	0,37	1,49	0,551
217,5	-8,48	0,32	1,77	0,566

EXTRAPOLATIONS ET RESTITUTION DU MODELE ISOTHERMIQUE A TRANSFERT MIXTE

profondeurs en cm	teneurs volumiques	fonction f(z)	teneurs restituées
0	0,38	0,049	-4,57
5	0,38	0,098	-5,21
10	0,38	0,146	-5,79
15	0,39	0,194	-6,31
20	0,40	0,242	-6,76
25	0,41	0,288	-7,17
30	0,42	0,334	-7,54
35	0,41	0,380	-7,87
40	0,40	0,428	-8,18
45	0,39	0,476	-8,46
50	0,39	0,524	-8,72
55	0,40	0,571	-8,95
60	0,42	0,617	-9,15
65	0,44	0,662	-9,33
70	0,46	0,705	-9,48
75	0,45	0,749	-9,63
80	0,45	0,793	-9,76
85	0,44	0,837	-9,88
90	0,46	0,880	-9,99
95	0,52	moyenne	0,436
100	0,58	régression z:f(z)	
105	0,64	penne	origine
110	0,62	-0,152	-0,753
115	0,61	calage du modèle	
120	0,59	profondeur	δ
125	0,57	5	-5,46
130	0,58	15	-6,44
135	0,60	30	-7,21
140	0,61	47,5	-8,48
145	0,62	67,5	-9,48
150	0,63	87,5	-11,11
155	0,64	régression entre f(z) et les valeurs norm.	
160	0,65	penne	origine
165	0,66	-2,12	0,252
170	0,68	soit E=44,9mm par an	

An.14: Teneurs isotopiques mesurées et modélisation de l'évaporation à Trois Bassins. Hypothèse du transfert mixte isotherme.

MODELE DE TRANSFERT EN PHASE LIQUIDE DOMINANTE			
Calcul de F(Z)		calage du modèle	
PROFONDEUR	FONCTION F(Z)	PROF.	F(Z) CALCUL. LN(DELTA)
CM	*1E-8	DE MESURE	
0	1,0972	5	0 0
5	2,1944	15	205636900 -0,1904965
10	3,2916	30	514092250 -0,370679
15	4,3607	47,5	873956825 -0,7646717
20	5,4030	67,5	1285230625 -1,2430755
25	6,4199	87,5	
30	7,4126	105	
35	8,4296		
40	9,4719		
45	10,5410		
50	11,6239		
55	12,6663		
60	13,7353		
65	14,8183		
70	15,8606		
75	16,8534		
80	17,8118		
85	18,7281		
90	19,6547		
95	20,5916		
100	21,5392		

REGRESSION F(Z) /LN(DELTA)	
PENTE	ORIGINE
-9,5E-10	0,03601503

DONC LE TAUX D'EVAPORATION EST DE:

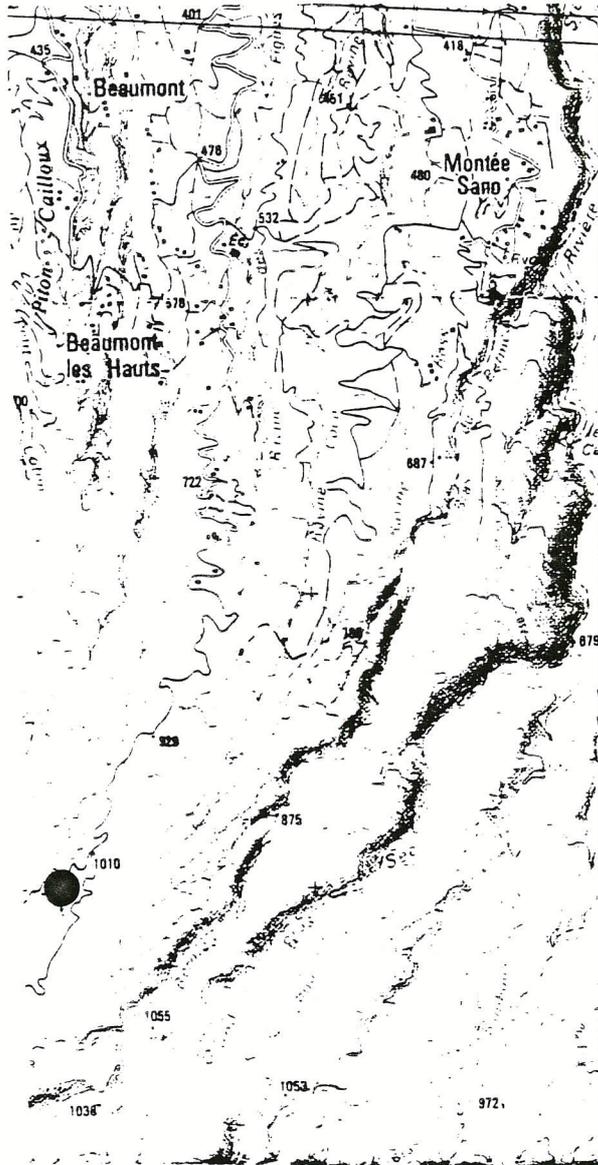
30 mm/an

REGRESSION PROFONDEUR et F(Z)	
PENTE	ORIGINE
0,2056	1,2660

An.15: Modélisation de l'évaporation à Trois Bassins selon l'hypothèse du transfert sous forme liquide.

PROFIL DE BEAUMONT

An.16: Situation du profil de Beaumont.



NORD

CARTE DE SITUATION

echelle: 1/25000

VALEURS MESUREES				
profondeurs en cm	teneurs O18 à pour mille	teneurs pondérales	densités humides	teneurs vol en eau
5,0	-6,58	0,44	1,03	0,45
15,0	-6,52	0,43	1,06	0,45
27,5	-7,40	0,40	0,95	0,38
40,0	-7,98	0,40	1,02	0,41
52,5		0,56	1,23	0,69
67,5	-8,12	0,18	1,27	0,23
81,0	-8,68	0,43	1,35	0,58
93,5	-5,40	0,50	1,49	0,75
115,0	-6,09	0,40	1,54	0,62
140,0	-4,84	0,39	1,62	0,63
167,5	-9,18	0,23	1,67	0,38
200,0	-5,85	0,43	1,49	0,64
230,0	-4,62	0,53	1,70	0,90
270,0	-4,15	0,38	1,67	0,63
370,0	-8,61	0,42	1,76	0,74

VALEURS EXTRAPOLEES ET FONCTION DE CALAGE					
profondeurs en cm	teneurs volumiques	fonction de calage F(z)	profondeurs en cm	teneurs volumiques	fonction de calage F(z)
0	0,45	0,051	135	0,62	1,349
5	0,45	0,103	140	0,63	1,390
10	0,45	0,154	145	0,58	1,434
15	0,45	0,206	150	0,54	1,480
20	0,42	0,259	155	0,49	1,529
25	0,39	0,315	160	0,45	1,581
30	0,39	0,371	165	0,40	1,636
35	0,40	0,426	170	0,40	1,691
40	0,41	0,480	175	0,44	1,743
45	0,51	0,528	180	0,48	1,792
50	0,62	0,570	185	0,52	1,840
55	0,60	0,613	190	0,56	1,885
60	0,48	0,663	195	0,60	1,973
65	0,33	0,724	200	0,64	1,969
70	0,27	0,791	205	0,68	2,008
75	0,37	0,849	210	0,73	2,046
80	0,46	0,899	215	0,76	2,082
85	0,58	0,943	220	0,81	2,117
90	0,68	0,983	225	0,86	2,151
95	0,74	1,020	230	0,90	2,183
100	0,71	1,058	235	0,86	2,216
105	0,68	1,098	240	0,82	2,251
110	0,64	1,139	245	0,79	
115	0,63	1,181	250	0,76	
120	0,62	1,223	255	0,72	
125	0,62	1,265	260	0,69	
130	0,62	1,307	265	0,66	
			270	0,63	

F(z)A15 CM	LN(à NORM)	TENEUR VOL	MOY=0,582
0,000	-0,019		
0,134	-0,430	REGRESSION DE CALAGE	
0,275	-0,839	PENTE	ORIGINE
0,364	-0,968	-2,490	-0,076
0,694	-1,777	E=70mm par an	

An.17: Teneurs isotopiques mesurées et modélisation de l'évaporation à Beaumont. Hypothèse du transfert mixte isotherme.

MODELE DE TRANFERT ISOTHERME EN PHASE LIQUIDE

profondeur cm	fonction de cal. f(Z)*1E-8	CALAGE DU MODELE		
		PROFONDEURS LN(DELTA)		F(Z)*1E-8
0	0,927			
5	1,853	15,0	-0,019	0,000
10	2,780	27,5	-0,430	2,596
15	3,706	40,0	-0,839	5,190
20	4,699	67,5	-1,770	10,797
25	5,768	81,0		
30	6,837			
35	7,879			
40	8,896			
45	9,569			
50	10,264			
55	11,132			
60	12,396			
65	13,940			
70	15,067			
75	15,973			
80	16,692			
85	17,305			
90	17,869			
95	18,456			
100	19,069			

REGRESSION F(Z)E-8/LN(DELTA)			
calage du modele			
pen	orig		
-0,16231	-0,0104266		
	E=0,162	E-8	m.s-1
ou	51mm	par an	

RESTITUTION DU MODELE DE TRANSFERT EN PHASE LIQUIDE

profondeur	restitution des teneurs
15	-6,54
20	-6,86
25	-7,15
30	-7,39
35	-7,59
40	-7,76
45	-7,85
50	-7,94
55	-8,04
60	-8,16
65	-8,27
70	-8,34
75	-8,39
80	-8,42
85	-8,44
90	-8,47
95	-8,48
100	-8,50

An.18: Modélisation de l'évaporation à Beaumont selon l'hypothèse du transfert sous forme liquide.

PROFIL DE LA MONTAGNE

An.19: Situation du Profil de La Montagne.



CARTE DE SITUATION

echelle:1/25000

VALEURS MESUREES

PROF. cm	TENEURS 18O δ pour mille	teneurs pon. en eau	densités humides	teneurs vol. en eau
7,5	-3,50	0,24	1,16	0,279
25,0	-4,34	0,26	1,21	0,314
37,5	-4,50	0,28	1,16	0,326
52,5	-5,71	0,28	1,16	0,326
82,5	-5,15	0,31	1,27	0,395
90,0	-4,34	0,31	1,40	0,433
105,0	-5,03	0,30	1,34	0,402

extrapolations et restitution du modèle

PROF. cm	TENEUR VOL EXTRAPOLEE	fonction de calage f(z)	valeurs de δ calculées (restitution)
0	0,27	0,038	-3,13
5	0,28	0,074	-3,41
10	0,29	0,111	-3,66
15	0,30	0,146	-3,87
20	0,31	0,181	-4,07
25	0,31	0,215	-4,23
30	0,32	0,249	-4,38
35	0,33	0,282	-4,52
40	0,33	0,315	-4,63
45	0,33	0,348	-4,74
50	0,33	0,381	-4,84
55	0,34	0,414	-4,92
60	0,35	0,446	-5,00
65	0,36	0,477	-5,06
70	0,37	0,507	-5,12
75	0,38	0,537	-5,18
80	0,39	0,567	-5,22
85	0,41	0,595	-5,26
90	0,43	0,623	-5,30
95	0,42		
100	0,41		
105	0,40		

moyenne 0,347
droite de régression entre f(z) et z
pente origine
0,00652 0,04894

calage du modèle

ln(delta)	f(z)
0,000	0,098
-0,478	0,212
-0,602	0,293
	0,391
régression linéaire	
-3,15024	0,27335656
l'évaporation calculée est	
1,68E-09 m.s-1	
soit E=	53mm.a-1

An.20: Teneurs isotopiques mesurées et modélisation de l'évaporation à La Montagne. Hypothèse du transfert mixte isotherme.

profondeurs cm	humidités volumiques	fonction de calage	teneurs restituées
0	0,27	-221578900	-3,03
5	0,28	-72672800	-3,34
10	0,285	73627000	-3,61
15	0,3	212599900	-3,84
20	0,305	349300600	-4,04
25	0,31	486796400	-4,22
30	0,32	614089200	-4,37
35	0,325	7423796400	-4,5
40	0,33	868722000	-4,62
45	0,33	995067000	-4,73
50	0,33	1121411000	-4,83
55	0,34	1244040000	-4,91
60	0,35	1363165000	-4,99
65	0,36	1478981000	-5,05
70	0,37	1598981000	-5,11
75	0,38	1701387000	-5,17
80	0,39	1808294000	-5,21
85	0,41	1909986000	-5,25
90	0,425	2008088000	-5,29

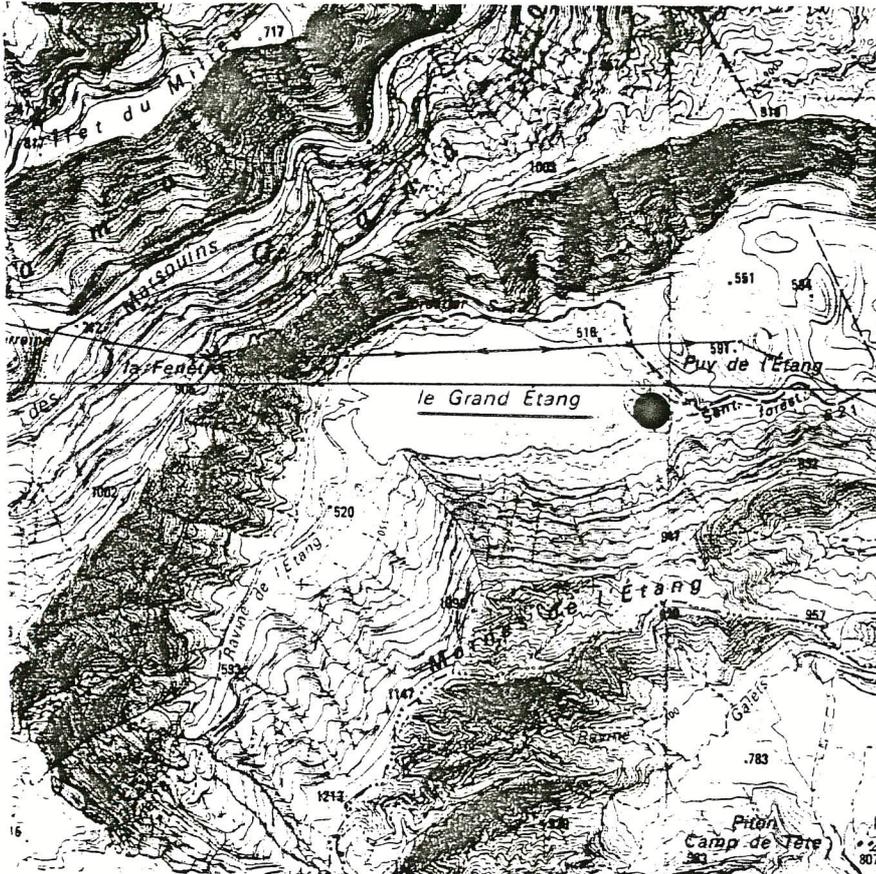
calage du modèle		
profondeurs cm	log des teneurs normalisées	fonction de calage
7,5	0	31446259
25	-0,4781818	465565811
37,5	-0,6023722	775651204

droite de régression f(Z) vs log(teneurs normalisées)	
penne=	-8,282E-10
origine	0,0088555
soit une évaporation de 25,8mm par an	

An.21: Modélisation de l'évaporation à La Montagne selon l'hypothèse du transfert sous forme liquide.

PROFIL DE GRAND-ETANG

An.22: Situation du profil de Grand Etang



NORD

CARTE DE SITUATION

echelle: 1/25000

VALEURS MESUREES

Profondeurs en cm	DENSITES HUMIDES	TENEURS PONDERALES EN EAU	TENEURS VOLUMIQUES EN EAU	18 O pour mille vs smow
10	1,13	0,49	0,43	-3,45
30	1,29	0,50	0,38	-4,04
70	1,42	0,51	0,35	-4,28
92,5	1,48	0,55	0,37	-3,18
117,5	1,51	0,51	0,40	-5,26
160	1,56	0,45	0,29	-3,68
moyennes	1,40	0,50	0,37	-3,98

An.23 Teneurs en ^{18}O dans l'eau du sol de Grand Etang

PROFIL GRAND ETANG	
prof. (cm)	teneur en Cl- meq. par litre
5	0,17
10	0,14
25	0,10
50	0,08
70	0,10
90	0,05
115	0,06
140	0,08

PROFIL LA MONTAGNE	
prof. (cm)	teneur en Cl- meq. par litre
7,5	0,63
25,0	0,47
37,5	0,52
52,5	0,21
82,5	0,14
90,0	0,32
105,0	0,19

PROFIL DE BEAUMONT	
profondeur	Cl-meq/l
0	0,63
14	0,66
30	0,41
52	0,57
90	0,29
115	0,26
141	0,24
171	0,1
212	0,1
280	0,1
385	0,05
416	0,06

PROFIL TROIS BASSINS	
prof. (cm)	teneur en Cl- meq. par litre
5,0	0,91
15,0	0,54
30,0	0,63
47,5	0,29
67,5	0,21
87,5	0,18
105,0	0,36
125,0	0,21
170,0	0,22
195,0	0,24
217,5	0,23

An.24 Teneurs en ions chlorures dans l'eau des sols des Hauts.

nom	Alt. (m)	type de point d'eau	code BSS	date			nom commun	Secteur	Localisation
				1986	1986	1987			
MACIL	1205	Etang	26 8x 02	29/03	14/09		Cilaos	Village de Cilaos	
CIL1	1908	Sce Captée	26 8x 32	29/03	14/09		Cilaos	Rempart de Cilaos , versant Nord- Ouest	
CIL39	1400	Sce Captée	26 8x 39	29/03	14/09		Cilaos	Rive gauche, Bras des Etangs	
CIL45	1340	Sce	26 8x 07	29/03	14/09		Cilaos	Route de l'ilet à Corde	
CILB	1210	Sce Captée	26 8x 43	29/03	14/09		Cilaos	Village de Cilaos	
CILD	1220	Sce	28 4x 07	29/03	14/09		Cilaos	Route de l'ilet à Corde	
CILE	1324	Ravine	26 8x 07	29/03	14/09		Cilaos	Route de l'ilet à Corde	
CILF	1300	Sce	26 8x 07	29/03	14/09		Cilaos	Route de l'ilet à Corde	
CILG	1290	Sce captée	26 8x 42	29/03	14/09		Cilaos	Route de l'ilet à Corde	
CIL?	1200	Sce	26 8x 07	29/03	14/09		Cilaos	Route de l'ilet à Corde	
CILK	1086	Sce captée	28 4x 38	29/03	14/09		Cilaos	N5	
CILTHER1		Thermes	26 8x 39			14/11	Cilaos	Village de Cilaos	
CILTHER2		Thermes	26 8x 39			14/11	Cilaos	Village de Cilaos	
CILTHER3		Thermes	26 89x 39	29/03	14/09	14/11	Cilaos	Village de Cilaos	
DD24	1170	Sce Captée	26 3x 24		24/09		Dos d'ane	Rempart Est	
ES20	3	Puits	28 7x 20		10/09		Etang Salé	Etang salé les Bains sur la D17	
ES19	3	Puits	28 7x 19		10/09		Etang Salé	Etang salé les Bains sur la D17	
ES29	20	Piézomètre	28 7x 29		10/09		Etang Salé	A 200 m à l'ouest du cimetière	
ES 32	16	Puits	28 7x 32		10/09	28/09	Etang Salé	Près du Point Coté 16m	
ES36	15	Puits	28 7x 36		10/09		Etang Salé	Piste en direction du Jardin d'oiseaux	
ES36V	15	Puits	28 7x 37		10/09		Etang Salé	Piste en direction du Jardin d'oiseaux	
SSTLEU	25	Sce Captée	28 3x 23?		10/09	28/09	Etang Salé	Route du Bois de Nétles, avant le pont	
POSS36	50	Forage	26 3x 36	24/04	24/09		La Possession	Chemin du Boeuf	
POSSP35	50	Piézomètre	26 3x 35	24/04	24/09		La Possession	50m au sud de la route, près des maison	
PORT52	75	Piézomètre	26 2x 52		24/09		Le Port	Bord sud du pénitencier	
PORT F5	5	Piézomètre	26 2x F5		24/09		Le Port	Près du pont sur la rav. de la Possession	
DEZ13		Forage	26 2x 07	13/04			Le port	Zone Industrielle N°2	
AUCAP	1100	Sce captée	26 8x 23	08/04	07/09		Matate	Sentier Bellier-Aurère	
AUR 1		Sce		08/04			Matate		
AUR 2		Sce		08/04			Matate		
AUR 3		Sce		08/04			Matate		
ORCAS	850	Sce captée	26 3x 52	17/04	11/09		Orangers	Canalisation des Orangers	
ORSOU	850	Sce	27 7x 13	17/04	11/09		Orangers	Canalisation des Orangers	
ORCAP	830	Sce captée	26 7x 10	17/04	11/09		Orangers	Canalisation des Orangers	
ORNB	820	Sce	26 3x 33	17/04	11/09		Orangers	Canalisation des Orangers	
DUCLIOS		Puits	26 3x 01			1/11	Possession	Terrain de Boules de la Possession	
POCE	580	Sce captée	26 3x 07	20/03	09/10		Possession	D 41	
PO22	480	Sce captée	26 3x 22	20/03	09/10		Possession	D41 Ravine à Malheur	
PO23	120	Sce captée	26 3x 23	20/03	09/10		Possession	En bout de route de la Ravine	
PO35	55	Sce captée	26 3x 35	20/03	09/10	18/10	Possession	A 50m au Nord de la route	
PO68	520	Sce captée	26 3x 68	20/03	09/10		Possession	D 41 Ravine Touris	
POMAD	590	Sce captée	26 3x 07	20/03	09/10	7/10	Possession	D41 Ravine Malheur	
SAL35	268	Sce	27 2x 35	02/04	06/09		Salazie	D48 rive droite	

An.25: Points d'eau visités pendant les campagnes d'échantillonnages, altitudes, codes B.S.S., dénominations, situations.

SAL4	480	Réservoir	27 5x 04	02/04	06/09		Réservoir de Salazie	Salazie	Village de Salazie
SAL43	1120	Scé captée	26 8x 49	02/04	06/09		Cascade de La Ravine Blanche	Salazie	Route de la Mare à Martin
SALB	550	Cascade	27 5x 12	02/04	06/09		Voie de la marée	Salazie	Rempart de l'Eperon
SALC	550	Scé	27 5x 07	02/04	06/09		Scé jlet Bananier	Salazie	Rempart de l'Eperon
SALD	430	Scé	27 5x 07	02/04	06/09		Scé de la passerelle	Salazie	Rempart de l'Eperon
SALE	570	Ravine	26 8x 07	02/04	06/09		Radier de la Roche Plate	Salazie	D 52 entre Mare à Vieille place & Gad lie
SALS1	1045	Ravine	26 8x 07	02/04	06/09		Radier de la Roche Jacquot	Salazie	Route de Mare à Martin
SAL2	505	Scé captée	27 5x 02	02/04	06/09	24/05	Scé au-dessus de Salazie	Salazie	Village de Salazie
SAL26	1310	Scé captée	27 7x 26	02/04	06/09		Caplage du Col du Belier	Salazie	Route Forestière du Bellier
RIVMAT	30	Ravine	27 2x 07	02/04	07/10		Rivière du Mat	St anne	Environs de Bras-Panon
RIVRO	1350	Ravine	27 7x 07	16/04	07/10		Rivière des Roches	St Anne	Lit de la Rivière St Anne
RESTA	15	Scé	1227 7x 07	14/04	07/10	24/10	Résurgence Ste Anne	St Anne	Sur N2, St Francois, Les Lataniers
SMAR	3	Scé captée	1227 7x 07	14/04	07/10		Scé Marville	St Anne	
STOINET	3	Scé captée	1227 7x 07	14/04	07/10		Scé Toinette	St Anne	
5X05	55	Forage	26 5x 25		18/09		Réservoir des Filaos	St Gilles	A 50m au Nord du réservoir
BOUC9	20	Piézomètre	26 5x 09		18/09	4/10	Boucan Cannot	St Gilles	Piste sur le Flan du Cap Homard , 200m
CHCAR	60	Piézomètre	26 5x 07	30/04	23/09	29/09	Chemin Carosse, G. de la Rav St Gilles	St Gilles	Piste du Moulin Kader
CM18	5	Puits	26 6x 18		23/09		Camp militaire	St Gilles	Colonie de Cilaos
CM52	58	Forage	26 6x 52	29/04	23/09	7/11	Hautures de camp militaire	St Gilles	Au-dessus du lot, Bellevue
CM9	5	Puits	26 6x 18		23/09		Camp militaire	St Gilles	Au sud de camp militaire
FUM	12	Piézomètre	26 5x 03		23/09		Usine à Manioc	St Gilles	Entre les Filaos et La Saline les Bains
GRRAV	25	Forage	26 6x 37		23/09	08/11	Rive gauche de la Grande Ravine	St Gilles	Piste d'accès Temporaire
SC3	15	Puits	26 6x 03		23/09		Souris chaude, puits côtier	St Gilles	entre la N1 et la route de bord de Mer
SG15	5	Puits	26 5x 07		04/10		Nappe des sables	St Gilles	L'Hermitage
SG18	4	Forage	26 5x 18	25/04	18/09	08/11	Aquifère basaltique	St Gilles	A l'est de la N 1, les Filaos
SG19	4	Piézomètre	26 5x 19	25/04	18/09		Nappe des sables	St Gilles	A 10 m a l'Est de SG18
SG20	2	Piézomètre	26 5x 20		18/09		Nappe des sables	St Gilles	A l'Ouest de la N1 , Les Filaos
SG4	50	Piézomètre	26 5x 04		18/09		Chateau d'eau des Filaos	St Gilles	A 10m. à l'Ouest du réservoir
SG43	47	Forage	26 5x 43	26/04	23/09	28/05	Pompage de la saline	St Gilles	Camp militaire, à droite de la piste
SG56	35	Piézomètre	26 5x 56		23/09		Piézo de la station de pompage	St Gilles	100 m en contrebas de SG43
SG6N	45	Piézomètre	26 5x 06	23/04	04/10		Rive droite de la Rav. St Gilles	St Gilles	Au bout de la route des Rampliers
SG6R	50	Forage	26 5x 26		18/09	9/11	Réservoir des Filaos	St Gilles	Au sud du réservoir
SGP12	5	Puits	26 5x 07		18/09		Nappe des sables	St Gilles	L'Hermitage
SGP14	5	Puits	26 5x 14	25/04	18/09	27/05	Trou d'eau	St Gilles	Sortie sud de la Saline les Bains
SGP15	3	Puits	26 5x 15		18/09		Nappe des sables	St Gilles	L'Hermitage
B .P.		Canal				08/11	Canal Prune	St Gilles	D10
KAUFMANT		Puit				23/10	Bassin de "Chez Kaufmant"	St Gilles	LesFilaos
S. SOUCIS		Forage				15/10	Bassin du Grand Pourrier	St Gilles	Chemin Lambert
COLIM	143	Forage	26 5x 41?		04/10		Premier virage à droite de la D12	St Leu	Bord de la Petite Ravine
SL38	15	Piézomètre	28 2x 38		04/10		Village de St Leu	St Leu	2ème lacet de la route
SL41B	30	Puits	26 5x 41		04/10		Station de pompage des collinacons	St Leu	Première piste à droite sur la D12
PIERREFOND		Forage				6/10	Forage des Cocos	St Louis	Plateau du Gol, Le Bel Air
SL5	25	Puits	26 5x 05		04/10		Puits désaffecté de la Rav. des Collinacons	St Paul	Rav. des Collinacons
SP1	3	Scé & puits	26 2x 01	25/03	02/10	02/11	Source Grande Fontaine	St Paul	Tour des Roches
SP2	3	Scé Caplée	26 2x 02	25/03	02/10	04/11	Source Bouillon	St Paul	Tour des Roches

SP29A	20	Scé	26 2x 29	25/03	02/10		Grotte des Premiers Français (Cascade)	St Paul	Sortie Sud de St Paul
SP29B	7	Scé	26 2x 07	25/03	02/10	26/05	Grotte des Premiers Français (fracture)	St Paul	Sortie Sud de St Paul
SP3	3	Scé	26 2x 03	25/03	02/10		Scé de la Roche Blanche	St Paul	Tour des Roches
SP30	25	Scé	26 2x 30	25/03	02/10		Scé de la Ravine Bernica	St Paul	Riv Gauche
SP3A	3	Scé	26 2x 03(bis)	25/03	02/10	25/05	Scé de la Roche Blanche	St Paul	Tour des Roches
SP6	3	Scé Captée	26 2x 06	25/03	02/10		Scé des Champs Coins	St Paul	Tour des Roches
SP7	3	Scé Captée	26 2x 07	25/03	02/10		Scé Champcourts	St Paul	Tour des Roches
SP8	3	Scé Captée	26 2x 08	25/03	02/10	22/05	Scé Moulin	St Paul	Tour des Roches
SPBA	3	Scé Captée	26 2x 27	25/03	02/10		Scé Barois	St Paul	Sortie Sud de St Paul
SPDA		Scé	26 2x 07	25/03	02/10		Scé Macabit	St Paul	Tour des Roches
SPPHI	3	Scé Captée	26 2x 32	25/03	02/10	05/10	Source derrière l'hôpital psychiatrique	St Paul	Sortie Sud de St Paul
GR ET	512	Etang	27 6x 07	16/04	06/10		Grand Etang	Takamaka	
MILLBB	250	Scé	27 7x 07	16/04	06/10		Source de Millemont	Takamaka	Route Hubert Delisle
MILBR	280	Scé	27 7x 07	16/04	06/10		Scé Bras Batisse	Takamaka	Route Hubert Delisle
MILF	300	Scé	27 7x 07	16/04	06/10		Scé Bras Batardeau	Takamaka	Route Hubert Delisle
EDF1		Galerie				07/10	Venue d'eau sur les cendres	Takamaka	Galerie EDF de Takamaka
EDF2		Galerie				07/10	Venue d'eau	Takamaka	Galerie EDF de Takamaka
TEV34	1080	Scé captée	28 3x 34	05/03	05/10		Scé Cadet	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV38A	1150	Scé captée	28 3x 35	05/03	05/10	4/10	Scés du Bras de Jeanne	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV38B	1150	Scé captée	28 3x 61	05/03	05/10		Scé Durac	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV38C	1150	Scé captée	28 3x 38	05/03	05/10		"	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV43D	1110	Scé captée	28 3x 43	05/03	05/10		Ravine des avirons	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV43G	1100	Scé captée	28 3x 45	05/03	05/10		"	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV44	1100	Scé captée	28 3x 44	05/03	05/10		"	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV46A	1100	Scé captée	28 3x 46	05/03	05/10		"	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV46B	1100	Scé captée	28 3x 47	05/03	05/10		"	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV46C	1100	Scé captée	28 3x 07	05/03	05/10		"	Tévélave	Route Forestière du Tévélave
TEV63	1050	Scé captée	28 3x 63	05/03	05/10		Scé Fourcade	Tévélave	Route Forestière du Tévélave

nom	Conductivités microsiemens par cm	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SiO ₂	Salinité totale
		.....millimoles par litre.....					.....millimoles par litre.....					
MACIL	211	0,35	0,043	0,649	0,165	0,183	1,45	0,070	0,000	0,000	0,519	3,428
CIL1	68	0,15	0,066	0,167	0,140	0,017	0,70	0,012	0,000	0,000	0,450	1,704
CIL39	296	0,91	0,051	0,616	0,115	0,000	2,40	0,084	0,000	0,005	0,336	4,520
CIL45	297	1,68	0,069	0,317	0,058	0,102	2,40	0,034	0,000	0,062	0,403	5,120
CILB	317	0,91	0,041	0,561	0,206	0,000	2,45	0,080	0,000	0,000	0,323	4,574
CILD	236	1,24	0,033	0,444	0,189	0,011	1,85	0,025	0,000	0,000	0,456	4,249
CILE	210	0,52	0,043	0,359	0,148	0,000	1,65	0,026	0,000	0,000	0,340	3,089
CILF	320	1,13	0,072	0,848	0,230	0,000	2,70	0,026	0,000	0,000	0,493	5,500
CILG	238	0,41	0,020	0,511	0,197	0,051	1,85	0,050	0,000	0,000	0,313	3,398
CIL?	250	0,45	0,018	0,544	0,313	0,000	2,15	0,015	0,000	0,000	0,599	4,088
CILK	306	2,18	0,036	0,264	0,062	0,107	1,80	0,291	0,000	0,000	0,410	5,145
AUCAP	140	0,33	0,051	0,230	0,107	0,011	1,05	0,005	0,000	0,000	0,543	2,329
ORCAS	119	0,29	0,072	0,160	0,177	0,209	0,95	0,014	0,074	0,005	0,733	2,686
ORSOU	119	0,38	0,074	0,147	0,086	0,386	0,50	0,000	0,000	0,012	0,516	2,104
ORCAP	84	0,24	0,051	0,115	0,206	0,149	0,80	0,015	0,026	0,009	0,733	2,348
ORNB	101	0,28	0,036	0,140	0,226	0,200	1,00	0,000	0,000	0,003	0,866	2,754
RIVMAT	157	0,49	0,038	0,384	0,177	0,099	1,60	0,062	0,013	0,005	0,416	3,281
SAL35	171	0,38	0,023	0,462	0,111	0,175	1,30	0,009	0,010	0,009	0,546	3,028
SAL4	210	0,51	0,115	0,424	0,413	0,121	1,60	0,036	0,040	0,018	0,613	3,885
SAL43	84	0,22	0,054	0,140	0,049	0,037	0,60	0,005	0,013	0,026	0,386	1,532
SALB	144	0,44	0,031	0,312	0,090	0,054	1,55	0,005	0,013	0,006	0,346	2,843
SALC	76	0,24	0,049	0,167	0,099	0,037	0,65	0,004	0,039	0,012	0,353	1,655
SALD	156	0,38	0,038	0,299	0,128	0,071	1,20	0,029	0,000	0,005	0,326	2,479
SALE	290	0,81	0,082	0,424	0,576	0,048	2,25	0,198	0,015	0,006	0,360	4,765
SALS1	227	0,44	0,023	0,549	0,119	0,039	1,80	0,076	0,056	0,003	0,336	3,436
SAL2	276	0,39	0,059	0,482	0,469	0,121	2,10	0,077	0,079	0,012	0,703	4,489
SAL26	118	0,64	0,023	0,257	0,066	0,045	1,00	0,008	0,016	0,014	0,353	2,421
GR ET	27	0,09	0,008	0,075	0,074	0,200	0,01	0,000	0,050	0,006	0,017	0,522
RIVRO	94	0,23	0,018	0,342	0,128	0,299	0,65	0,019	0,037	0,003	0,233	1,961
MILLBB	87	0,21	0,008	0,150	0,230	0,299	0,70	0,010	0,000	0,002	0,266	1,874
MILBR	106	0,25	0,013	0,160	0,214	0,200	0,85	0,000	0,019	0,008	0,333	2,046
MILF	92	0,18	0,010	0,150	0,239	0,200	0,80	0,009	0,019	0,002	0,266	1,878
DD24	127	0,17	0,010	0,344	0,218	0,141	0,95	0,083	0,000	0,002	0,400	2,323
POCE	226	0,35	0,026	0,254	0,506	0,200	1,55	0,015	0,000	0,006	0,829	3,735
PO22	225	0,37	0,031	0,259	0,354	0,302	1,55	0,018	0,000	0,017	0,862	3,759
PO23	202	0,30	0,031	0,272	0,325	0,107	1,40	0,012	0,000	0,005	0,623	3,071
PO35	257	0,35	0,033	0,317	0,514	0,102	1,90	0,008	0,000	0,002	0,643	3,867
PO68	230	0,38	0,046	0,299	0,428	0,302	1,65	0,019	0,000	0,005	0,829	3,957
POMAD	180	0,27	0,069	0,205	0,267	0,251	1,10	0,014	0,000	0,014	0,563	2,753
TEV34	95	0,21	0,013	0,180	0,177	0,750	0,90	0,005	0,000	0,002	0,333	2,569
TEV38A	112	0,29	0,082	0,180	0,160	0,195	0,95	0,008	0,016	0,000	0,383	2,266
TEV38B	70	0,18	0,010	0,197	0,160	0,299	0,60	0,000	0,031	0,003	0,416	1,894
TEV38C	75	0,17	0,013	0,205	0,099	0,172	0,60	0,000	0,008	0,000	0,416	1,687
TEV43D	97	0,20	0,010	0,170	0,193	0,209	0,85	0,000	0,000	0,000	0,416	2,053
TEV43G	100	0,23	0,010	0,172	0,160	0,203	0,90	0,000	0,000	0,000	0,400	2,071
TEV44	92	0,20	0,010	0,207	0,107	0,000	0,90	0,010	0,000	0,000	0,385	1,815
TEV46A	82	0,20	0,008	0,207	0,086	0,000	0,88	0,000	0,000	0,000	0,406	1,783
TEV46B	89	0,20	0,008	0,150	0,082	0,000	0,96	0,000	0,000	0,000	0,388	1,785
TEV46C	128	0,18	0,010	0,190	0,078	0,000	1,40	0,000	0,000	0,000	0,438	2,299
TEV63	103	0,24	0,051	0,180	0,107	0,197	0,80	0,000	0,000	0,000	0,416	1,990

An.26: Résultats des analyses des eaux éloignées de l'océan en saison sèche 1986 (millimoles par litre).

nom	Conductivités	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	Som.	som.	bal.
	microsiemens par cm	.....milliéquivalents par litre.....				.....milliéquivalents par litre.....				+	-	%	
MACIL	211	0,35	0,043	1,30	0,33	0,183	1,45	0,140	0,000	0,000	2,02	1,77	13
CIL1	68	0,15	0,066	0,33	0,28	0,017	0,70	0,024	0,000	0,000	0,83	0,74	12
CIL39	296	0,91	0,051	1,23	0,23	0,000	2,40	0,168	0,000	0,009	2,43	2,58	-6
CIL45	297	1,68	0,069	0,63	0,12	0,102	2,40	0,068	0,000	0,123	2,49	2,69	-8
CILB	317	0,91	0,041	1,12	0,41	0,000	2,45	0,160	0,000	0,000	2,49	2,61	-5
CILD	236	1,24	0,033	0,89	0,38	0,011	1,85	0,050	0,000	0,000	2,54	1,91	28
CILE	21	0,52	0,043	0,72	0,30	0,000	1,65	0,052	0,000	0,000	1,58	1,70	-8
CILF	320	1,13	0,072	1,70	0,46	0,000	2,70	0,052	0,000	0,000	3,36	2,75	20
CILG	238	0,41	0,020	1,02	0,39	0,051	1,85	0,100	0,000	0,000	1,84	2,00	-8
CIL?	250	0,45	0,018	1,09	0,63	0,000	2,15	0,030	0,000	0,000	2,18	2,18	0
CILK	306	2,18	0,036	0,53	0,12	0,107	1,80	0,582	0,000	0,000	2,86	2,49	14
AUCAP	140	0,33	0,051	0,46	0,21	0,011	1,05	0,010	0,000	0,000	1,06	1,07	-2
ORCAS	119	0,29	0,072	0,32	0,35	0,209	0,95	0,028	0,074	0,009	1,04	1,27	-20
ORSOU	119	0,38	0,074	0,29	0,17	0,386	0,50	0,000	0,000	0,024	0,92	0,91	1
ORCAP	84	0,24	0,051	0,23	0,41	0,149	0,80	0,030	0,026	0,018	0,94	1,02	-9
ORNB	101	0,28	0,036	0,28	0,45	0,200	1,00	0,000	0,000	0,006	1,05	1,21	-14
RIVMAT	157	0,49	0,038	0,77	0,35	0,099	1,60	0,124	0,013	0,009	1,65	1,85	-11
SAL35	171	0,38	0,023	0,92	0,22	0,175	1,30	0,018	0,010	0,018	1,55	1,52	2
SAL4	210	0,51	0,115	0,85	0,83	0,121	1,60	0,072	0,040	0,036	2,29	1,87	20
SAL43	84	0,22	0,054	0,28	0,10	0,037	0,60	0,010	0,013	0,051	0,65	0,71	-8
SALB	144	0,44	0,031	0,62	0,18	0,054	1,55	0,010	0,013	0,012	1,27	1,64	-25
SALC	76	0,24	0,049	0,33	0,20	0,037	0,65	0,008	0,039	0,024	0,83	0,76	8
SALD	156	0,38	0,038	0,60	0,26	0,071	1,20	0,058	0,000	0,009	1,28	1,34	-5
SALE	290	0,81	0,082	0,85	1,15	0,048	2,25	0,396	0,015	0,012	2,89	2,72	6
SALS1	227	0,44	0,023	1,10	0,24	0,039	1,80	0,152	0,056	0,006	1,79	2,05	-13
SAL2	276	0,39	0,059	0,96	0,94	0,121	2,10	0,154	0,079	0,024	2,35	2,48	-5
SAL26	118	0,64	0,023	0,51	0,13	0,045	1,00	0,016	0,016	0,027	1,31	1,10	17
GR ET	27	0,09	0,008	0,15	0,15	0,200	0,01	0,000	0,050	0,012	0,39	0,27	38
RIVRO	94	0,23	0,018	0,68	0,26	0,299	0,65	0,038	0,037	0,006	1,19	1,03	14
MILLBB	87	0,21	0,008	0,30	0,46	0,299	0,70	0,020	0,000	0,003	0,98	1,02	-5
MILBR	106	0,25	0,013	0,32	0,43	0,200	0,85	0,000	0,019	0,015	1,01	1,09	-7
MILF	92	0,18	0,010	0,30	0,48	0,200	0,80	0,018	0,019	0,003	0,97	1,04	-7
DD24	127	0,17	0,010	0,69	0,44	0,141	0,95	0,166	0,000	0,003	1,31	1,26	4
POCE	226	0,35	0,026	0,51	1,01	0,200	1,55	0,030	0,000	0,012	1,89	1,79	5
PO22	225	0,37	0,031	0,52	0,71	0,302	1,55	0,036	0,000	0,033	1,62	1,92	-17
PO23	202	0,30	0,031	0,54	0,65	0,107	1,40	0,024	0,000	0,009	1,52	1,54	±1
PO35	257	0,35	0,033	0,63	1,03	0,102	1,90	0,016	0,000	0,003	2,04	2,02	1
PO68	230	0,38	0,046	0,60	0,86	0,302	1,65	0,038	0,000	0,009	1,88	2,00	-6
POMAD	180	0,27	0,069	0,41	0,53	0,251	1,10	0,028	0,000	0,027	1,28	1,41	-9
TEV34	95	0,21	0,013	0,36	0,35	0,750	0,90	0,010	0,000	0,003	0,94	1,66	-56
TEV38A	112	0,29	0,082	0,36	0,32	0,195	0,95	0,016	0,016	0,000	1,05	1,18	-11
TEV38B	70	0,18	0,010	0,39	0,32	0,299	0,60	0,000	0,031	0,006	0,90	0,94	-4
TEV38C	75	0,17	0,013	0,41	0,20	0,172	0,60	0,000	0,008	0,000	0,80	0,78	2
TEV43D	97	0,20	0,010	0,34	0,39	0,209	0,85	0,000	0,000	0,000	0,94	1,06	-12
TEV43G	100	0,23	0,010	0,34	0,32	0,203	0,90	0,000	0,000	0,000	0,90	1,10	-20
TEV44	92	0,20	0,010	0,41	0,21	0,000	0,90	0,020	0,000	0,000	0,83	0,92	-10
TEV46A	82	0,20	0,008	0,41	0,17	0,000	0,88	0,000	0,000	0,000	0,79	0,88	-11
TEV46B	89	0,20	0,008	0,30	0,16	0,000	0,96	0,000	0,000	0,000	0,67	0,96	-36
TEV46C	128	0,18	0,010	0,38	0,16	0,000	1,40	0,000	0,000	0,000	0,73	1,40	-63
TEV63	103	0,24	0,051	0,36	0,21	0,197	0,80	0,000	0,000	0,000	0,86	1,00	-14

An.27: Résultats des analyses des eaux éloignées de l'océan pendant la saison sèche 1986 (milliéquivalents par litre).

	Temp (°C)	pH	Cond. micro siemens par cm	+	+	2+	2+	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	total
CIL45	17,7	8,01	200	0,683	0,013	0,524	0,232	0,08	2,03	0,208	3,770
CILB	15,4	7,50	170	1,501	0,041	0,237	0,268	0,07	1,74	0,514	4,371
CILH	16,8	7,77	190	0,644	0,014	0,492	0,185	0,07	2,09	0,552	4,047
CIL?	18,1	7,80	240	1,722	0,008	0,337	0,036	0,16	2,56	0,502	5,325
MACIL	22,4	6,57	215	0,652	0,034	0,482	0,204	7,20	1,41	0,475	10,457
CILG	18,6	7,90	235	1,218	0,041	0,848	0,201	0,08	2,72	0,348	5,456
CILDTH	16,0	7,87	235	0,779	0,024	0,519	0,037	0,08	2,63	0,330	4,399
CIL1	15,1	6,70	50	0,361	0,047	0,123	0,022	0,08	0,53	0,403	1,561
CIL38	19,6	7,50	230	1,044	0,013	0,123	0,105	0,15	2,32	0,788	4,543
CIL40	17,9	8,05	185	0,748	0,019	0,424	0,138	0,07	2,03	0,788	4,217
CILE	18,4	7,90	170	0,848	0,010	0,499	0,120	0,06	1,83	0,392	3,759
CIL RL	16,1	8,40	220	1,000	0,058	0,489	0,105	0,06	2,51	0,482	4,708
CILC	17,3	7,76	140	0,726	0,014	0,365	0,099	0,04	1,61	0,421	3,271
CILD	16,0	7,30	130	1,205	0,010	0,185	0,037	0,06	1,72	0,424	3,645
CIL CG	16,2	7,20	215	0,683	0,013	0,524	0,233	0,08	2,09	0,380	4,003
AUR2	14,5	7,03	56	0,612	0,032	0,574	0,063	0,06	0,66	0,367	2,368
AUR5	17,9	7,95	130	0,522	0,038	0,17	0,086	0,07	1,23	0,823	2,941
AUR23	17,2	7,19	100	0,469	0,038	0,225	0,062	0,06	1,05	0,721	2,629
AUR4	19,9	7,50	200	0,687	0,048	0,457	0,165	0,08	2,17	0,710	4,317
ORCAPT	23,0	7,35	110	0,565	0,031	0,145	0,422	0,13	0,98	0,695	2,968
ORNB	19,6	7,15	78	0,582	0,046	0,146	0,054	0,10	0,81	0,739	2,472
OR SOU	21,4	7,50	120	0,587	0,027	0,272	0,233	0,10	1,18	0,263	2,662
DD19	18,8	6,62	113	0,426	0,015	0,14	0,093	0,13	0,10	0,725	1,628
DD24	15,6	7,10	80	0,522	0,043	0,145	0,104	0,10	1,05	0,741	2,696
SALC	22,2	7,38	61	0,500	0,029	0,108	0,029	0,06	0,58	0,703	2,009
SAL2	21,5	7,70	235	0,631	0,041	0,539	0,178	0,13	1,90	0,697	4,116
SAL4	21,7	7,44	150	0,761	0,090	0,285	0,086	0,14	1,39	0,625	3,372
SALD	20,3	7,40	110	0,487	0,014	0,232	0,085	0,11	1,04	0,505	2,473
SALRMT	19,3	7,01	61	0,522	0,038	0,111	0,030	0,08	0,67	0,759	2,206
SAL26	15,3	7,25	92	0,848	0,051	0,179	0,026	0,07	1,00	0,352	2,526
SAL49	16,8	7,10	62	0,422	0,027	0,117	0,024	0,06	0,68	0,468	1,798
SAL9	21,6	6,70	120	0,574	0,018	0,479	0,121	0,07	1,70	0,412	3,369
SALCAS	21,6	7,90	210	1,435	0,028	0,574	0,134	0,12	2,13	0,649	5,072
SALB	18,4	7,23	92	0,761	0,020	0,242	0,065	0,10	0,81	0,444	2,437
SAL29	18,4	6,92	120	0,565	0,020	0,45	0,088	0,06	1,21	0,491	2,879
TEV63	14,5	6,86	90	0,391	0,013	0,12	0,127	0,20	0,85	0,344	2,045
TEV46B	15,3	7,40	62	0,409	0,013	0,185	0,049	0,14	0,29	0,444	1,525
TEV46A	15,6	6,10	70	0,983	0,010	0,1	0,040	0,11	0,83	0,427	2,500
TEV38A	15,7	7,00	58	0,991	0,013	0,11	0,042	0,09	1,05	0,365	2,661
TEV38B	15,7	7,01	70	0,435	0,225	0,102	0,051	0,13	0,86	0,350	2,148
TEV44D	15,7	6,61	90	0,422	0,010	0,2	0,073	0,11	0,90	0,435	2,152
TEV34	15,4	6,60	83	0,270	0,010	0,118	0,074	0,13	0,80	0,452	1,849
TEV38C	15,1	7,02	72	0,513	0,010	0,145	0,525	0,13	0,74	0,415	2,473
TEV38D	14,6	6,72	64	0,383	0,012	0,13	0,022	0,08	0,61	0,426	1,667
TEV44G	16,0	6,78	90	0,435	0,014	0,04	0,080	0,14	0,88	0,429	2,013
TEV46C	15,6	7,50	82	0,318	0,010	0,145	0,058	0,13	0,70	0,479	1,840
MILLBR	20,4	6,40	78	0,409	0,006	0,127	0,088	0,17	0,72	0,678	2,202

An.28: Résultats des analyses partielles des eaux éloignées de l'océan pendant la saison humide 1985-1986 (millimoles par litre).

	Temp (°C)	pH	Cond. micro siemens par cm	.....milliéquivalents par litre...								bal. élect. part- -ielle %
				+	+	2+	2+	-	-	total +	total -	
				Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO3			
CIL45	17,7	8,01	200	0,683	0,013	1,048	0,464	0,08	2,03	2,208	2,110	5
CILB	15,4	7,50	170	1,501	0,041	0,474	0,536	0,07	1,74	2,552	1,810	34
CILH	16,8	7,77	190	0,644	0,014	0,984	0,370	0,07	2,09	2,012	2,160	-7
CIL?	18,1	7,80	240	1,722	0,008	0,674	0,072	0,16	2,56	2,476	2,720	-9
MACIL	22,4	6,57	215	0,652	0,034	0,964	0,408	0,72	1,41	2,058	2,130	-3
CILG	18,6	7,90	235	1,218	0,041	1,696	0,402	0,08	2,72	3,357	2,800	18
CILDTH	16,0	7,87	235	0,779	0,024	1,038	0,074	0,08	2,63	1,915	2,710	-34
CIL1	15,1	6,70	50	0,361	0,047	0,246	0,043	0,08	0,53	0,697	0,605	14
CIL38	19,6	7,50	230	1,044	0,013	0,246	0,210	0,15	2,32	1,513	2,470	-48
CIL40	17,9	8,05	185	0,748	0,019	0,848	0,276	0,07	2,03	1,891	2,100	-10
CILE	18,4	7,90	170	0,848	0,010	0,998	0,240	0,06	1,83	2,096	1,890	10
CIL RL	16,1	8,40	220	1,000	0,058	0,978	0,210	0,06	2,51	2,246	2,574	-14
CILC	17,3	7,76	140	0,726	0,014	0,730	0,198	0,04	1,61	1,668	1,646	1
CILD	16,0	7,30	130	1,205	0,010	0,370	0,074	0,06	1,72	1,659	1,784	-7
CIL CG	16,2	7,20	215	0,683	0,013	1,048	0,466	0,08	2,09	2,21	2,170	2
AUR2	14,5	7,03	56	0,612	0,032	1,148	0,126	0,06	0,66	1,918	0,720	91
AUR5	17,9	7,95	130	0,522	0,038	0,340	0,172	0,07	1,23	1,072	1,302	-19
AUR23	17,2	7,19	100	0,469	0,038	0,450	0,124	0,06	1,05	1,081	1,114	-3
AUR4	19,9	7,50	200	0,687	0,048	0,914	0,330	0,08	2,17	1,979	2,250	-13
ORCAPT	23,0	7,35	110	0,565	0,031	0,290	0,844	0,13	0,98	1,73	1,110	44
ORNB	19,6	7,15	78	0,582	0,046	0,292	0,108	0,10	0,81	1,028	0,905	13
OR SOU	21,4	7,50	120	0,587	0,027	0,544	0,466	0,10	1,18	1,624	1,280	24
DD19	18,8	6,62	113	0,426	0,015	0,280	0,186	0,13	1,00	0,907	1,125	-21
DD24	15,6	7,10	80	0,522	0,043	0,290	0,208	0,10	1,05	1,063	1,141	-7
SALC	22,2	7,38	61	0,500	0,029	0,216	0,058	0,06	0,58	0,803	0,640	23
SAL2	21,5	7,70	235	0,631	0,041	1,078	0,356	0,13	1,90	2,106	2,030	4
SAL4	21,7	7,44	150	0,761	0,090	0,570	0,172	0,14	1,39	1,593	1,525	4
SALD	20,3	7,40	110	0,487	0,014	0,464	0,170	0,11	1,04	1,135	1,150	-1
SALRMT	19,3	7,01	61	0,522	0,038	0,222	0,060	0,08	0,67	0,842	0,746	12
SAL26	15,3	7,25	92	0,848	0,051	0,358	0,052	0,07	1,00	1,309	1,070	20
SAL49	16,8	7,10	62	0,422	0,027	0,234	0,048	0,06	0,68	0,731	0,740	-1
SAL9	21,6	6,70	120	0,574	0,018	0,958	0,242	0,07	1,70	1,792	1,765	2
SALCAS	21,6	7,90	210	1,435	0,028	1,148	0,268	0,12	2,13	2,879	2,252	24
SALB	18,4	7,23	92	0,761	0,020	0,484	0,130	0,10	0,81	1,395	0,905	43
SAL29	18,4	6,92	120	0,565	0,020	0,900	0,176	0,06	1,21	1,661	1,265	27
TEV63	14,5	6,86	90	0,391	0,013	0,240	0,254	0,20	0,85	0,898	1,050	-16
TEV46B	15,3	7,40	62	0,409	0,013	0,370	0,098	0,14	0,29	0,89	0,425	71
TEV46A	15,6	6,10	70	0,983	0,010	0,200	0,080	0,11	0,83	1,273	0,940	30
TEV38A	15,7	7,00	58	0,991	0,013	0,220	0,084	0,09	1,05	1,308	1,140	14
TEV38B	15,7	7,01	70	0,435	0,225	0,204	0,102	0,13	0,86	0,966	0,985	-2
TEV44D	15,7	6,61	90	0,422	0,010	0,400	0,146	0,11	0,90	0,978	1,012	-3
TEV34	15,4	6,60	83	0,270	0,010	0,236	0,148	0,13	0,80	0,664	0,925	-33
TEV38C	15,1	7,02	72	0,513	0,010	0,290	1,050	0,13	0,74	1,863	0,865	73
TEV38D	14,6	6,72	64	0,383	0,012	0,260	0,044	0,08	0,61	0,699	0,694	1
TEV44G	16,0	6,78	90	0,435	0,014	0,080	0,160	0,14	0,88	0,689	1,015	-38
TEV46C	15,6	7,50	82	0,318	0,010	0,290	0,116	0,13	0,70	0,734	0,830	-12
MILLBR	20,4	6,40	78	0,409	0,006	0,254	0,176	0,17	0,72	0,845	0,894	-6

An.29: Résultats des analyses partielles des eaux éloignées de l'océan pendant la saison humide 1985-1986 (milliéquivalents par litre).

nom	CATIONS			ANIONS				
	+ +	++	++	-	2-	-	2-	-
	Na +K	Ca	Mg	HCO3	SO4	NO3	PO4	CL
%	%	%	%	%	%	%	%	
MACIL	19	64	16	82	7,9	0,0	0,0	10,3
CIL1	26	40	34	94	3,2	0,0	0,0	2,3
CIL39	40	51	9	93	6,5	0,0	0,3	0,0
CIL45	70	25	5	89	2,5	0,0	4,6	3,8
CILB	38	45	17	94	6,1	0,0	0,0	0,0
CILD	50	35	15	97	2,6	0,0	0,0	0,6
CILE	36	45	19	97	3,1	0,0	0,0	0,0
CILF	36	50	14	98	1,9	0,0	0,0	0,0
CILG	23	56	21	92	5,0	0,0	0,0	2,5
CIL?	21	50	29	99	1,4	0,0	0,0	0,0
CILK	77	18	4	72	23,4	0,0	0,0	4,3
AUCAP	36	44	20	98	0,9	0,0	0,0	1,0
ORCAS	35	31	34	75	2,2	5,8	0,7	16,4
ORSOU	50	32	19	55	0,0	0,0	2,6	42,4
ORCAP	31	25	44	78	2,9	2,5	1,8	14,6
ORNB	30	27	43	83	0,0	0,0	0,5	16,6
RIVMAT	32	47	21	87	6,7	0,7	0,5	5,4
SAL35	26	60	14	85	1,2	0,7	1,2	11,5
SAL4	27	37	36	86	3,9	2,1	1,9	6,5
SAL43	42	43	15	84	1,4	1,8	7,2	5,2
SALB	37	49	14	95	0,6	0,8	0,7	3,3
SALC	36	40	24	86	1,1	5,1	3,2	4,9
SALD	33	47	20	90	4,3	0,0	0,7	5,3
SALE	31	29	40	83	14,5	0,6	0,4	1,8
SALS1	26	61	13	88	7,4	2,7	0,3	1,9
SAL2	19	41	40	85	6,2	3,2	1,0	4,9
SAL26	51	39	10	91	1,4	1,4	2,4	4,1
GR ET	24	38	38	2	0,0	18,7	4,5	74,9
RIVRO	21	58	22	63	3,7	3,6	0,6	29,0
MILLBB	22	31	47	68	2,0	0,0	0,3	29,3
MILBR	26	32	42	78	0,0	1,8	1,4	18,4
MILF	20	31	49	77	1,7	1,8	0,3	19,2
DD24	14	53	33	75	13,2	0,0	0,2	11,2
POCE	20	27	53	87	1,7	0,0	0,7	11,2
PO22	24	32	44	81	1,9	0,0	1,7	15,7
PO23	21	36	43	91	1,6	0,0	0,6	6,9
PO35	19	31	50	94	0,8	0,0	0,1	5,0
PO68	23	32	46	83	1,9	0,0	0,5	15,1
POMAD	26	32	42	78	2,0	0,0	1,9	17,9
TEV34	24	38	38	54	0,6	0,0	0,2	45,1
TEV38A	35	34	30	81	1,4	1,4	0,0	16,6
TEV38B	21	44	35	64	0,0	3,3	0,6	31,9
TEV38C	24	52	25	77	0,0	1,0	0,0	22,1
TEV43D	23	36	41	80	0,0	0,0	0,0	19,7
TEV43G	26	38	36	82	0,0	0,0	0,0	18,4
TEV44	25	50	26	98	2,2	0,0	0,0	0,0
TEV46A	26	52	22	100	0,0	0,0	0,0	0,0
TEV46B	31	45	25	100	0,0	0,0	0,0	0,0
TEV46C	26	52	21	100	0,0	0,0	0,0	0,0
TEV63	34	42	25	80	0,0	0,0	0,0	19,8
MOYENNE	30,6	40,9	28,5	83,0	3,1	1,2	0,9	11,9
ECART TYP	12,2	10,5	13,0	16,1	4,3	2,9	1,4	14,3

An.30: Pourcentages cationiques et anioniques des teneurs en milliéquivalents par litre des eaux éloignées de l'océan.- saison sèche1986-

	CATIONS			ANIONS	
	+ + Na + K	++ Ca	++ Mg	- HCO3	- Cl
	%	%	%	%	%
CIL45	32	47	21	96	4
CILB	60	19	21	96	4
CILH	33	49	18	97	3
CIL?	70	27	3	94	6
MACIL	33	47	20	66	34
CILG	38	51	12	97	3
CILDTH	42	54	4	97	3
CIL1	59	35	6	87	13
CIL38	70	16	14	94	6
CIL40	41	45	15	97	3
CILE	41	48	11	97	3
CIL RL	47	44	9	98	2
CILC	44	44	12	98	2
CILD	73	22	4	96	4
CIL CG	31	47	21	96	4
AUR2	34	60	7	92	8
AUR5	52	32	16	94	6
AUR23	47	42	11	94	6
AUR4	37	46	17	96	4
ORCAPT	34	17	49	88	12
ORNB	61	28	11	89	11
OR SOU	38	33	29	92	8
DD19	49	31	21	89	11
DD24	53	27	20	92	8
SALC	66	27	7	91	9
SAL2	32	51	17	94	6
SAL4	53	36	11	91	9
SALD	44	41	15	90	10
SALRMT	67	26	7	90	10
SAL26	69	27	4	93	7
SAL49	61	32	7	92	8
SAL9	33	53	14	96	4
SALCAS	51	40	9	95	5
SALB	56	35	9	89	11
SAL29	35	54	11	95	5
TEV63	45	27	28	81	19
TEV46B	47	42	11	67	33
TEV46A	78	16	6	88	12
TEV38A	77	17	6	92	8
TEV38B	68	21	11	87	13
TEV44D	44	41	15	89	11
TEV34	42	36	22	86	14
TEV38C	28	16	56	85	15
TEV38D	57	37	6	88	12
TEV44G	65	12	23	86	14
TEV46C	45	40	16	84	16
MILLBR	49	30	21	81	19

An.31: Pourcentages cationiques et anioniques des teneurs en milliequivalents par litre des eaux éloignées de l'océan.- saison humide 1985/1986- analyses partielles-

NOM	+		2+		-		2-		2-		-		Sal- inité (total)
	Na	K	Ca	Mg	HCO3	CO3	PO4	NO3	SO4	Cl	SiO2		
	.....millimoles par litre.....		.....millimoles par litre.....		.....millimoles par litre.....		.....millimoles par litre.....		.....millimoles par litre.....		.....millimoles par litre.....	
5X05	2,133	0,105	0,534	0,477	2,300	0,000	0,000	0,003	0,184	1,103	0,882	7,721	
BOUC9	1,807	0,071	0,986	1,740	5,900	0,000	0,011	0,385	0,078	0,652	1,331	12,961	
CHCAR	6,138	0,210	0,240	0,070	5,500	0,225	0,002	0,000	0,000	0,951	0,120	13,456	
CM18	5,442	0,168	0,659	0,958	4,700	0,000	0,004	0,189	0,302	5,757	0,832	19,011	
CM52	9,578	0,297	0,529	1,069	1,451	0,000	0,005	0,142	0,475	9,563	0,616	23,725	
COLIM	4,005	0,173	0,439	0,782	1,000	0,000	0,006	0,053	0,254	4,556	0,582	11,850	
CM9	7,053	0,236	0,813	1,205	2,000	0,000	0,004	0,095	0,424	7,312	0,882	20,024	
ES20	16,805	0,570	2,458	5,964	4,951	0,000	0,000	0,348	1,509	25,049	0,666	58,320	
ES19	16,543	0,743	1,547	3,866	11,651	0,000	0,058	0,201	1,322	12,045	0,656	48,632	
ES29	1,872	0,205	0,529	1,645	4,551	0,000	0,000	0,027	0,000	2,003	0,143	10,975	
ES 32	1,524	0,150	0,741	2,057	2,600	0,000	0,004	1,606	0,270	2,054	0,725	11,731	
ES36	3,788	0,215	0,606	1,156	2,200	0,000	0,017	0,087	0,239	3,244	0,566	12,118	
ES36V	4,245	0,360	1,223	3,048	7,751	0,050	0,000	0,000	0,097	3,865	0,742	21,381	
FUM	7,619	0,262	0,811	1,604	2,351	0,000	0,013	0,258	0,584	8,313	0,982	22,797	
GRRAV	2,373	0,134	0,424	0,448	0,800	0,000	0,008	0,042	0,171	3,498	0,592	8,490	
PORT52	0,740	0,076	0,649	0,148	1,951	0,000	0,003	0,029	0,239	0,197	0,566	4,598	
PORT F5	13,235	0,428	0,986	2,262	2,200	0,000	0,005	0,166	0,697	14,725	0,732	35,436	
POSS36	1,219	0,092	0,454	0,510	2,451	0,000	0,012	0,166	0,146	0,762	0,865	6,677	
POSSP35	0,522	0,021	0,736	1,584	4,600	0,000	0,006	0,015	0,167	0,339	0,815	8,805	
SC3	19,482	0,559	1,118	2,756	1,251	0,000	0,004	0,093	1,201	23,535	0,649	50,648	
SG15	6,530	0,089	0,459	0,185	5,151	0,000	0,005	0,150	0,583	6,008	0,433	19,593	
SG18	2,460	0,189	0,344	0,263	0,851	0,000	0,003	0,003	0,327	1,952	0,166	6,558	
SG19	2,155	0,084	1,372	0,625	4,051	0,000	0,006	0,192	0,193	1,402	0,849	10,929	
SG20	38,311	1,470	0,352	0,452	19,700	0,000	0,011	0,016	1,735	18,528	0,516	81,091	
SG4	2,155	0,168	0,324	0,489	2,100	0,000	0,007	0,361	0,167	0,750	1,248	7,769	
SG43	5,007	0,152	0,813	0,925	1,551	0,000	0,004	0,155	0,269	5,157	0,782	14,815	
SG56	3,069	0,108	0,414	0,514	1,651	0,000	0,027	0,153	0,170	2,804	0,749	9,659	
SG6N	4,441	0,131	0,245	0,276	2,000	0,000	0,002	0,000	0,146	3,216	0,083	10,540	
SG6R	2,024	0,199	0,414	0,292	2,251	0,000	0,002	0,040	0,100	0,666	0,300	6,288	
SGP12	20,570	1,727	1,722	3,702	8,751	0,000	0,002	0,214	1,349	16,525	0,566	55,128	
SGP14	8,359	0,399	0,539	1,255	1,800	0,000	0,006	0,313	0,474	8,412	0,948	22,505	
SGP15	11,754	0,528	1,971	2,345	6,400	0,000	0,003	0,158	1,123	10,516	0,599	35,397	
SL38	20,810	0,787	0,898	2,262	1,400	0,000	0,001	0,145	1,666	28,039	0,033	56,041	
SL41B	5,224	0,197	0,606	0,942	0,900	0,000	0,005	0,044	0,437	8,999	0,582	17,936	
SL5	7,619	0,029	0,497	0,823	0,700	0,000	0,015	0,050	0,484	8,762	0,486	19,465	
SP1	1,654	0,092	0,289	0,337	1,451	0,000	0,008	0,158	0,198	1,298	0,765	6,250	
SP2	0,771	0,068	0,240	0,218	1,051	0,000	0,003	0,106	0,071	1,001	0,682	4,211	
SP29A	0,971	0,045	0,499	0,457	2,000	0,000	0,006	0,248	0,074	0,499	0,932	5,731	
SP29B	0,871	0,045	0,392	0,452	1,800	0,000	0,007	0,271	0,074	0,601	0,915	5,428	
SP3	0,914	0,066	0,230	0,148	1,051	0,000	0,005	0,047	0,062	0,649	0,699	3,871	
SP30	0,966	0,171	0,369	0,321	1,700	0,000	0,000	0,139	0,031	0,530	0,899	5,126	
SP3A	0,871	0,079	0,225	0,193	1,100	0,000	0,005	0,055	0,050	0,705	0,666	3,949	
SP6	0,522	0,076	0,277	0,082	0,751	0,000	0,003	0,039	0,025	0,451	0,499	2,725	
SP7	1,524	0,087	0,217	0,263	0,751	0,000	0,005	0,048	0,239	1,664	0,566	5,364	
SP8	9,534	0,339	1,846	0,082	1,551	0,000	0,005	0,193	0,573	10,212	0,666	25,001	
SPBA	0,566	0,131	0,344	0,333	1,400	0,000	0,004	0,163	0,034	0,417	0,832	4,224	
SPDA	0,292	0,052	0,299	0,074	0,851	0,000	0,002	0,044	0,000	0,186	0,599	2,399	
SPPHI	0,488	0,042	0,372	0,292	1,400	0,000	0,002	0,124	0,025	0,299	0,865	3,909	
SSTLEU	1,741	0,039	0,339	0,596	2,751	0,000	0,000	0,227	0,111	0,085	0,829	6,718	
RESTA	0,213	0,026	0,245	0,062	0,600	0,000	0,005	0,016	0,016	0,200	0,416	1,799	
SMAR	0,261	0,047	0,245	0,074	0,700	0,000	0,003	0,047	0,047	0,141	0,399	1,964	
STOINET	0,244	0,026	0,250	0,128	0,700	0,000	0,005	0,048	0,014	0,200	0,366	1,981	

An.32: Résultats des analyses partielles des eaux proches de l'océan pendant la saison sèche 1986 (millimoles par litre).

NOM	+	+	2+	2+	-	2-	2-	2-	2-	-	som.	som.	bal. élec %
	Na	K	Ca	Mg	HCO3	CO3	PO4	NO3	SO4	Cl			
milliéquivalents par litre.....milliéquivalents par litre.....												
5X05	2,133	0,105	1,068	0,954	2,30	0,00	0,000	0,003	0,368	1,103	4,3	3,8	12
BOUC9	1,807	0,071	1,972	3,480	5,90	0,00	0,022	0,385	0,156	0,652	7,3	7,1	3
CHCAR	6,138	0,210	0,480	0,140	5,50	0,45	0,004	0,000	0,000	0,951	7,0	6,9	1
CM18	5,442	0,168	1,318	1,916	4,70	0,00	0,008	0,189	0,604	5,757	8,8	11,3	-25
CM52	9,578	0,297	1,058	2,138	1,45	0,00	0,010	0,142	0,950	9,563	13,1	12,1	8
COLIM	4,005	0,173	0,878	1,564	1,00	0,00	0,012	0,053	0,508	4,556	6,6	6,1	8
CM9	7,053	0,236	1,626	2,410	2,00	0,00	0,008	0,095	0,848	7,312	11,3	10,3	9
ES20	16,805	0,570	4,916	11,928	4,95	0,00	0,000	0,348	3,018	25,049	34,2	33,4	2
ES19	16,543	0,743	3,094	7,732	11,65	0,00	0,116	0,201	2,644	12,045	28,1	26,7	5
ES29	1,872	0,205	1,058	3,290	4,55	0,00	0,000	0,027	0,000	2,003	6,4	6,6	-3
ES 32	1,524	0,150	1,482	4,114	2,60	0,00	0,008	1,606	0,540	2,054	7,3	6,8	7
ES36	3,788	0,215	1,212	2,312	2,20	0,00	0,034	0,087	0,478	3,244	7,5	6,0	22
ES36V	4,245	0,360	2,446	6,096	7,75	0,10	0,000	0,000	0,194	3,865	13,1	11,9	10
FUM	7,619	0,262	1,622	3,208	2,35	0,00	0,026	0,258	1,168	8,313	12,7	12,1	5
GRRAV	2,373	0,134	0,848	0,896	0,80	0,00	0,016	0,042	0,342	3,498	4,3	4,7	-9
PORT52	0,740	0,076	1,298	0,296	1,95	0,00	0,006	0,029	0,478	0,197	2,4	2,7	-12
PORT F5	13,235	0,428	1,972	4,524	2,20	0,00	0,010	0,166	1,394	14,725	20,2	18,5	9
POSS36	1,219	0,092	0,908	1,020	2,45	0,00	0,024	0,166	0,292	0,762	3,2	3,7	-14
POSSP35	0,522	0,021	1,472	3,168	4,60	0,00	0,012	0,015	0,334	0,339	5,2	5,3	-2
SC3	19,482	0,559	2,236	5,512	1,25	0,00	0,008	0,093	2,402	23,535	27,8	27,3	2
SG15	6,530	0,089	0,918	0,370	5,15	0,00	0,010	0,150	1,166	6,008	7,9	12,5	-45
SG18	2,460	0,189	0,688	0,526	0,85	0,00	0,006	0,003	0,654	1,952	3,9	3,5	11
SG19	2,155	0,084	2,744	1,250	4,05	0,00	0,012	0,192	0,386	1,402	6,2	6,0	3
SG20	38,311	1,470	0,704	0,904	19,70	0,00	0,022	0,016	3,470	18,528	41,4	41,7	-1
SG4	2,155	0,168	0,648	0,978	2,10	0,00	0,014	0,361	0,334	0,750	3,9	3,6	8
SG43	5,007	0,152	1,626	1,850	1,55	0,00	0,008	0,155	0,538	5,157	8,6	7,4	15
SG56	3,069	0,108	0,828	1,028	1,65	0,00	0,054	0,153	0,340	2,804	5,0	5,0	0
SG6N	4,441	0,131	0,490	0,552	2,00	0,00	0,004	0,000	0,292	3,216	5,6	5,5	2
SG6R	2,024	0,199	0,828	0,584	2,25	0,00	0,004	0,040	0,200	0,666	3,6	3,2	12
SGP12	20,570	1,727	3,444	7,404	8,75	0,00	0,004	0,214	2,698	16,525	33,1	28,2	16
SGP14	8,359	0,399	1,078	2,510	1,80	0,00	0,012	0,313	0,948	8,412	12,3	11,5	7
SGP15	11,754	0,528	3,942	4,690	6,40	0,00	0,006	0,158	2,246	10,516	20,9	19,3	8
SL38	20,810	0,787	1,796	4,524	1,40	0,00	0,002	0,145	3,332	28,039	27,9	32,9	-16
SL41B	5,224	0,197	1,212	1,884	0,90	0,00	0,010	0,044	0,874	8,999	8,5	10,8	-24
SL5	7,619	0,029	0,994	1,646	0,70	0,00	0,030	0,050	0,968	8,762	10,3	10,5	-2
SP1	1,654	0,092	0,578	0,674	1,45	0,00	0,016	0,158	0,396	1,298	3,0	3,3	-10
SP2	0,771	0,068	0,480	0,436	1,05	0,00	0,006	0,106	0,142	1,001	1,8	2,3	-24
SP29A	0,971	0,045	0,998	0,914	2,00	0,00	0,012	0,248	0,148	0,499	2,9	2,9	0
SP29B	0,871	0,045	0,784	0,904	1,80	0,00	0,014	0,271	0,148	0,601	2,6	2,8	-7
SP3	0,914	0,066	0,460	0,296	1,05	0,00	0,010	0,047	0,124	0,649	1,7	1,9	-11
SP30	0,966	0,171	0,738	0,642	1,70	0,00	0,000	0,139	0,062	0,530	2,5	2,4	4
SP3A	0,871	0,079	0,450	0,386	1,10	0,00	0,010	0,055	0,100	0,705	1,8	2,0	-11
SP6	0,522	0,076	0,554	0,164	0,75	0,00	0,006	0,039	0,050	0,451	1,3	1,3	0
SP7	1,524	0,087	0,434	0,526	0,75	0,00	0,010	0,048	0,478	1,664	2,6	3,0	-14
SP8	9,534	0,339	3,692	0,164	1,55	0,00	0,010	0,193	1,146	10,212	13,7	13,1	4
SPBA	0,566	0,131	0,688	0,666	1,40	0,00	0,008	0,163	0,068	0,417	2,1	2,1	0
SPDA	0,292	0,052	0,598	0,148	0,85	0,00	0,004	0,044	0,000	0,186	1,1	1,1	0
SPPHI	0,488	0,042	0,744	0,584	1,40	0,00	0,004	0,124	0,050	0,299	1,9	1,9	0
SSTLEU	1,741	0,039	0,678	1,192	2,75	0,00	0,000	0,227	0,222	0,085	3,7	3,3	11
RESTA	0,213	0,026	0,490	0,124	0,60	0,00	0,010	0,016	0,032	0,200	0,9	0,9	0
SMAR	0,261	0,047	0,490	0,148	0,70	0,00	0,006	0,047	0,094	0,141	0,9	1,0	-11
STOINET	0,244	0,026	0,500	0,256	0,70	0,00	0,010	0,048	0,028	0,200	1,0	1,0	0

An.33: Résultats des analyses partielles des eaux proches de l'océan pendant la saison sèche 1986 (milliéquivalents par litre).

	Teneur en Oxygène 18 (pour mille vs smow)	teneur en Deuterium (pour mille vs smow)
SP3	-6,33	-41,4
SG5	-5,97	-39,2
FUM	-5,87	-38,1
SP8	-5,79	-37,5
POSS68	-4,75	-28,4
S ST LEU	-4,54	-26,3
SGP14	-5,48	-36,6
SPPHI	-5,83	-37,9
SG43	-5,59	-35,5
SG19	-5,84	-37,9
TEV46A	-5,91	-35,7
CHCAR	-6,14	-40,4
SP6	-7,00	-45,2
SL38	-6,81	-42,0
IRENNEE	-8,03	-53,2
FUM (B)	-5,87	-38,7

An.34: Teneurs en ^{18}O et ^2H des eaux souterraines prélevées en fin de saison sèche 1986.

Olivier GRÜNBERGER

**"Etude géochimique et isotopique de l'infiltration en régime
climatique contrasté - Massif du piton des Neiges -
- Ile de la Réunion - "**

RESUME: L'étude chimique et isotopique des éléments dissous des eaux de pluie, de l'eau du sol et des eaux souterraines permet la mise en évidence des caractères principaux du cycle hydrique sur une île volcanique tropicale à climat contrasté comme la Réunion (21°7S, 52°32W).

La variation des teneurs chimiques dans les pluies montrent une influence marquée de la présence marine qui diminue avec le relief. La répartition des teneurs isotopiques des précipitations montre une distribution similaire en situation "normale" et fortement perturbée lors de la forte dépression tropicale Clotilda où les teneurs sont très appauvries. Cette variation naturelle des teneurs, due aux pluies à forte ascendance, constitue un signal que l'on s'est efforcé de retrouver dans l'eau des profils de sols et dans les points d'eau.

L'examen des teneurs des eaux dans les sols montre, qu'en bas de pente, dans le secteur aride de l'île, se produit une évaporation irréductible alimentée par les nappes libres. Plus haut, sur les versants, il se produit une infiltration que l'on a pu également quantifier.

Les analyses chimiques et isotopiques des eaux souterraines montrent que la minéralisation globale est bien représentée, loin de l'océan, par la minéralisation carbonatée essentiellement d'origine biogénique. La composition cationique des eaux reflète les compositions chimiques des roches qu'elles ont lessivées. D'autre part, les circulations souterraines ne suivent pas obligatoirement la pente générale du volcan. Les aquifères côtiers montrent une hydrochimie où l'influence marine est prédominante mais où apparaît un pôle de minéralisation carbonatée et sulfatée. L'analyse des isotopes du carbone et des sulfates a permis de mettre en évidence une influence non négligeable de la culture de la canne à sucre et des temps de transit des aquifères probablement inférieurs à 35 ans. Les aquifères de la côte ouest sont peu protégés de la pollution de bas de versant et toute mise en valeur de cette côte devra tenir compte de la sensibilité des aquifères aux sources de pollution.

Mots clés : Hydrogéologie en terrain volcanique - Climat tropical contrasté - Hydrochimie et isotopes du milieu - infiltration et évaporation dans les sols - Circulations souterraines - Océan Indien - Ile de la Réunion -

Key words: Hydrogeology of volcanoes - Contrasted tropical climate - Hydrochemistry and environmental isotopes - infiltration and evaporation in soils - groundwater flows - Indian ocean - Reunion island -