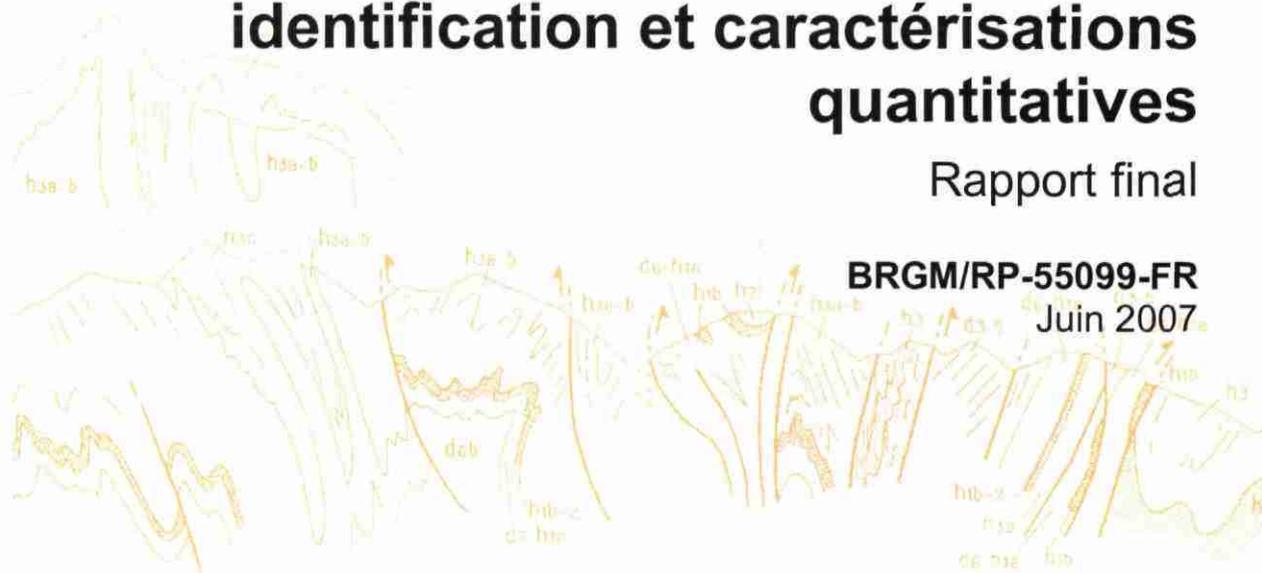




Elaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caractérisations quantitatives

Rapport final

BRGM/RP-55099-FR
Juin 2007



Direction Régionale de l'Environnement
MARTINIQUE



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Elaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caractérisations quantitatives

Rapport final

BRGM/RP-55099-FR

Juin 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2005-2007

B. Vittecoq, P. Lachassagne, S. Lanini, B. Ladouche, JC. Marechal, V. Petit

Vérificateur :

Nom : JP. Comte

Date :

Original signé par

JP. Comte

Approbateur :

Nom : JP. Comte

Date :

Original signé par

JP. Comte

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : bilan hydrologique, modelisation, ressource en eau souterraine, SIG, systeme d'information et de gestion des eaux souterraines, Martinique, DOM

En bibliographie, ce rapport sera cite de la facon suivante :

Vittecoq B., Lachassagne P., Lanini S., Ladouche B., Marechal J.C., Petit V. (2007) Elaboration d'un systeme d'information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caracterisations quantitatives. Rapport BRGM/RP-55099-FR, 221 p., 87 ill., 8 ann.

© BRGM, 2007, ce document ne peut etre reproduit en totalite ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Elements d'hydrogéologie des milieux volcaniques	15
2.1. GEOLOGIE – LITHOLOGIE DES FORMATIONS VOLCANIQUES.....	15
2.1.1. Le volcanisme à dominante basaltique.....	15
2.1.2. Le volcanisme de type andésitique	16
2.1.3. Les îles volcaniques.....	17
2.2. PROPRIETES HYDROGEOLOGIQUES DES PRINCIPAUX TYPES DE FORMATIONS VOLCANIQUES.....	18
2.2.1. Les laves.....	18
2.2.2. Les pyroclastites	23
2.2.3. Les hyaloclastites.....	25
2.2.4. Conglomérats et lahars	26
2.3. STRUCTURE DES AQUIFERES VOLCANIQUES.....	27
2.3.1. Hétérogénéités à toutes les échelles.....	27
2.3.2. Types de perméabilité.....	27
2.3.3. Altération.....	29
2.4. FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES VOLCANIQUES	31
2.4.1. Îles volcaniques basaltiques.....	31
2.4.2. Îles volcaniques andésitiques et stratovolcans	37
2.5. INTRODUCTION AUX BILANS HYDROLOGIQUES ET A LA MODELISATION.....	38
2.5.1. Bilan hydrologique.....	38
2.5.2. Modélisation mathématique – Gestion active des aquifères.....	39
3. Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie de la Martinique	41
3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIE.....	41
3.2. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES DES PRINCIPALES FORMATIONS GEOLOGIQUES - PRINCIPAUX AQUIFERES RECONNUS..	48
3.2.1. Les laves.....	48
3.2.2. Les pyroclastites	51
3.2.3. Les hyaloclastites.....	53
3.2.4. Les conglomérats et lahars	54

3.2.5. Les calcaires (origine sédimentaire)	54
3.2.6. Les formations superficielles récentes.....	55
3.3. AMELIORATION DE LA CONNAISSANCE.....	55
4. Méthodologie d'élaboration du système d'information géographique et présentation des différentes couches d'informations.....	57
4.1. INTRODUCTION.....	57
4.2. INFORMATIONS APPORTEES PAR LES FORAGES	57
4.2.1. Structure de la base de donnée associée.....	58
Synthèse des données hydrogéologiques disponibles.....	60
a) Les débits des essais de pompage	60
b) Relation lithologie/Débit.....	61
4.3. ELEMENTS SUR LA STRUCTURE DES AQUIFERES DE MARTINIQUE.....	64
4.3.1. Les unités constitutives d'aquifères (UCA)	64
a) La base de données.....	65
b) Délimitation des UCA	65
c) Estimation du débit potentiel instantané par forage au sein d'une UCA..	66
d) Estimation de la probabilité de réussite	67
e) Caractérisation du type de porosité des UCA.....	68
f) Représentation cartographique des UCA	68
4.3.2. Caractérisation de l'altération	72
a) L'altération hydrothermale et anchimétamorphisme	72
b) L'altération climatique.....	73
4.3.3. La carte des failles	74
4.4. ELEMENTS SUR LE FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES DE MARTINIQUE.....	75
4.4.1. Alimentation des aquifères (entrées).....	76
Cours d'eau infiltrant.....	76
4.4.2. Limite des bassins versants hydrogéologiques. Concept d'unités régionales	77
a) Limites des bassins versants hydrogéologiques.....	77
b) Découpage des Unités Régionales	79
c) Base de donnée associée aux Unités Régionales.....	80
4.4.3. Exutoires des eaux souterraines	81
a) Les sources.....	82
b) Ecoulement des eaux souterraines : cartes piézométriques.....	84
c) Les cours d'eau.....	88

•	Les cours d'eau drainant les eaux souterraines	88
•	Les cours d'eau infiltrant (alimentant les eaux souterraines)	88
d)	Zones d'apport direct à la mer.....	88
5.	Evaluation quantitative globale des ressources en eau souterraine de la Martinique.....	89
5.1.	INTRODUCTION.....	89
5.2.	CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE DE LA MARTINIQUE	89
5.2.1.	Pluviométrie	89
a)	Généralités.....	89
b)	Variations temporelles des pluies.....	89
c)	Variations spatiale des pluies	90
5.2.2.	Evapotranspiration	96
	Températures.....	96
	Evapotranspiration potentielle (ETP).....	96
5.2.3.	Bilan hydrologique.....	99
a)	Déficit d'écoulement.....	99
b)	Evapotranspiration réelle.....	99
c)	Bilans	99
5.3.	ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS PAR L'APPROCHE DE MODELISATION PLUIE-DEBIT (TEMPO)101	
5.3.1.	Principe général de l'approche de modélisation Tempo	101
5.3.2.	Application à la Martinique	102
5.3.3.	Exemple de résultats obtenus : bassins versants de la Capot amont et de Fond Rousseau.....	103
5.3.4.	Synthèse des résultats obtenus par l'approche de modélisation Tempo110	
5.4.	MODELISATION GLOBALE DES RESSOURCES EN EAU.....	111
5.4.1.	Principe de la modélisation globale	111
a)	Méthodologie	111
b)	Discrétisation et modèle de réservoirs.....	112
c)	Calcul de la pluie efficace.....	115
d)	Calcul du ruissellement et de l'infiltration.....	116
e)	Calcul du stock dans la nappe et du débit à l'exutoire	117
5.4.2.	Application à la Martinique	119
a)	Découpage de l'île en Unités Régionales (UR)	119
b)	Calcul de la pluie efficace à l'échelle du km ²	120
c)	Calcul du ruissellement et de l'infiltration à l'échelle du km ²	124
d)	Calcul des stocks et débits à l'échelle des UH	126

5.4.3. Modélisation numérique	131
a) Développement d'un simulateur numérique.....	131
b) Validation du simulateur	133
c) Calage du simulateur	137
5.5. RESULTATS : EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU.....	145
5.5.1. Pluie efficace.....	145
5.5.2. Bilans par Unité Régionale	146
6. Evaluation de la ressource en eau souterraine potentiellement exploitable en Martinique.....	149
6.1. METHODOLOGIE	149
6.1.1. Données d'entrées sur la ressource en eau	149
6.1.2. Définition de la surface maximale disponible pour la réalisation de forages au sein de chaque UR.....	150
6.1.3. Croisement surface disponible / aquifère sous jacent.....	151
6.1.4. Définition du « rayon d'action » des forages et, sur cette base, du nombre maximal de forages réalisables au sein de chaque type d'aquifère	152
6.1.5. Adéquation entre nombre de forages et ressource en eau souterraine potentiellement exploitable	153
Conséquences des pompages	154
6.1.6. Ressource maximale potentiellement exploitable	155
6.2. RESULTATS	155
6.2.1. Ressource potentiellement exploitable par unité	155
6.2.2. Synthèse des ressources potentiellement exploitable sur l'ensemble de la Martinique	163
7. Architecture du SIG.....	167
8. Références bibliographiques	169

Liste des illustrations

Illustration 1 : Coupe d'une coulée de type « aa » en mouvement.....	18
Illustration 2 : Schéma type d'une coulée andésitique, d'après Westercamp, 1972.....	19
Illustration 3 : Andésite 2 α présentant des figures du flux	20
Illustration 4 : Forages de Tsararano 1 (a : à gauche) et de Mtsangamouji 1 (b : à droite) à Mayotte. Débits au soufflage à l'avancement et coupes lithologiques	22
Illustration 5 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques des pyroclastites, citées dans la littérature (d'après Joux, 2002).	25
Illustration 6 : Exemple de la variabilité spatiale des formations volcaniques à l'échelle cartographique. Structures en paléovallées radiales par rapport à l'édifice du volcan bouclier du Morne Jacob (d'après la carte géologique de la Martinique au 1/50 000).	28
Illustration 7 : Schématisation des modèles hydrogéologiques hawaïen et canarien (d'après Folio, 2001).....	32
Illustration 8 : Modèle hydrogéologique schématique de l'île de la Réunion (d'après Stieltjes et al., 1986).....	34
Illustration 9 : esquisse géologique et structurale de la Martinique, d'après Westercamp, 1990.....	42
Illustration 10 : histoire géologique de la Martinique (Andreieff et Al, 1988).....	47
Illustration 11 : localisation des 174 forages réinterprétés dans le cadre du projet (en bleu).....	59
Illustration 12 : Histogramme des débits classés des 96 forages de Martinique pour lesquels cette information est disponible.....	60
Illustration 13 : Nombre de forages selon le débit testé	61
Illustration 14 : Histogramme des débits classés des forages réalisés dans les andésites et les basaltes	61
Illustration 15 : Histogramme des débits classés des forages réalisés dans les Nuées Ardentes et les ponces	62
Illustration 16 : Histogramme des débits classés des forages réalisés dans les hyaloclastites	62
Illustration 17 : Histogramme des débits classés des forages réalisés dans les alluvions, calcaire, conglomérats et lahars.....	63
Illustration 18 : Principe de découpage en niveau des unités hydrogéologiques	69
Illustration 19 : Débit potentiel instantané par forages, pour les unités de niveau 1 (formations affleurantes).....	70
Illustration 20	71
Illustration 21 : Altérations hydrothermales et anchimétamorphiques	73
Illustration 22 : Carte des failles, selon la carte géologique au 1/50000 ^{ème}	74

Illustration 23 : Corrélation entre altitude des forages et altitude du niveau piézométrique.....	78
Illustration 24 : Corrélation entre altitude des forages et altitude du niveau piézométrique, zoom sur la zone 100m /100m.....	78
Illustration 25 : Carte des unités régionales (avec le numéro de chaque UR), sur fond de la carte géologique au 1/50000 ^{ème}	80
Illustration 26 : Localisation des sources thermales et/ou minérales (en rouge) et des sources non thermales (en bleu), sur la carte géologique au 1/50000 ^{ème}	82
Illustration 27 : Données piézométriques utilisées pour réaliser la carte piézométrique du secteur de Saint Pierre	84
Illustration 28 : Carte piézométrique du secteur de St-Pierre (esquisse 1/50 000)	86
Illustration 29 : Cartes piézométrique du secteur du Lamentin (1/50 000).....	87
Illustration 30 : Cours d'eau pérennes (Source : DIREN).....	88
Illustration 31 : Moyennes mensuelles de pluviométrie (stations indiquées en annexe 1).....	90
Illustration 32 : Pluviométrie moyenne annuelle en Martinique (1915-2006) en mm/an	91
Illustration 33 : Pluviométrie moyenne annuelle sur plusieurs stations de Martinique (E : versant Est, O : versant Ouest, S : Sud de l'île).....	93
Illustration 34 : Pluviométrie mesurées aux stations de Martinique en fonction de leur altitude. Comparaison avec la côte sous le vent de la Guadeloupe.....	94
Illustration 35 : Découpage de la Martinique en 14 Zones Pluviométriquement Homogènes.....	95
Illustration 36 : ETP mensuelles calculées à la station de l'aéroport du Lamentin (période 1971-1985).....	96
Illustration 37 : Evapotranspiration moyenne annuelle en Martinique entre 1961et 1980 en mm/an	97
Illustration 38 : Évolution de l'ETP en fonction de l'altitude en Martinique et à la Réunion.....	98
Illustration 39 : Évolution des précipitations et de l'évapotranspiration réelle (ETR) en fonction de l'altitude	100
Illustration 40 : Localisation des bassins versants (en jaune), des stations hydrométriques (en rouge) et des stations pluviométriques (en bleu).....	103
Illustration 41 : Schéma de principe de la modélisation mis en oeuvre à l'aide du logiciel TEMPO	104
Illustration 42 : Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du ruissellement et de la recharge des aquifères (bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau)	105
Illustration 43 : Evolution temporelle du seuil de pluie efficace (bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau)	106
Illustration 44 : Comparaison du débit modélisé au débit mesuré (bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau)	107
Illustration 45 : Réponse impulsionnelle d'Oméga à la pluie et à l'ETP (bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau)	108

Illustration 46 : Evolution temporelle du ruissellement de surface et du débit issu de la composante souterraine (recharge et vidange de la zone noyée) ; Résultats des bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau	109
Illustration 47 : Synthèse des résultats des modélisations TEMPO.....	110
Illustration 48: Bilan hydrologique d'un bassin versant - Modèle de 3 reservoirs en cascade (d'après Thiéry, 2003).....	112
Illustration 49 : Discrétisation spatiale puis agrégation de l'infiltration et du ruissellement à l'échelle des UR.....	114
Illustration 50 : Principe du calcul de la pluie efficace.....	115
Illustration 51 : Schéma du deuxième réservoir	116
Illustration 52 : Schéma du troisième réservoir	118
Illustration 53 : Découpage de la Martinique en 24 Unités Régionales	120
Illustration 54 : Isohyètes, zones pluviométriquement homogènes et pluviomètres de référence.	122
Illustration 55 : Carte des Réserves Utiles maximale des sols	123
Illustration 56 : Variation des coefficients culturaux de la canne et de la banane au cours de l'année	124
Illustration 57 : contribution de la pente au ruissellement	125
Illustration 58 : Carte discrétisée des pentes de la Martinique.....	126
Illustration 59 : Valeurs par défaut du temps de transit moyen dans la nappe pour chaque UR.....	127
Illustration 60 : Définition du facteur de forme pour une UH	128
Illustration 61 : Facteur de forme de chaque UR	128
Illustration 62 : Débits moyens journaliers des prélèvements d'eau de surface	129
Illustration 63 : Répartition mensuelle théorique des débits prélevés au sein des UR22 et 23.....	130
Illustration 64 : Capture d'écran du simulateur numérique.....	132
Illustration 65 : Bilan hydrique du sol au Lamentin (1977-1981) calculé au moyen du simulateur	134
Illustration 66 : Termes des bilans hydriques pour chaque compartiment du modèle.....	135
Illustration 67 : Comparaison Pluie efficace – débit à l'exutoire pour 11 BV instrumentés	136
Illustration 68 : Localisation des points de mesures exploitables (hydrométrie et piézométrie).....	138
Illustration 69 : Carte des coefficients de ruissellement	140
Illustration 70 : Jeu de paramètres calé	141
Illustration 71 : Comparaison simulation – observation (UR11, 18 et 24).....	144
Illustration 72 : Carte de la pluie efficace moyenne annuelle (en mm)	145
Illustration 73 : Pluie efficace annuelle (en mm) calculée au niveau des pluviomètres de référence	146

Illustration 74 : Bilan hydrologique moyen 1987-1997 calculé pour chaque UR (hors stocks).....	147
Illustration 75 : Aires disponibles pour la réalisation de forages eu sein des UR de Martinique	151
Illustration 76 – Rayon d'action à « long terme » et surface correspondante, pour les forages de Martinique, en fonction de leur débit d'exploitation (pompage 20h/24).....	152
Illustration 77 : Résultats hydrologiques, par unité régionale (état actuel).....	156
Illustration 78 : Surface utilisable pour la réalisation de forages, par unité régionale et pour les différentes classes de forages	157
Illustration 79 : Nombre de forages potentiellement réalisables, volumes prélevés et impacts, par unité régionale.....	158
Illustration 80 : Variabilité spatiale de la pluie efficace par unité régionale	159
Illustration 81 : Variabilité spatiale de l'écoulement rapide, par unité régionale.....	159
Illustration 82 : Variabilité spatiale de l'infiltration, par unité régionale	160
Illustration 83 : Pourcentage de l'eau infiltrée s'écoulant directement en mer	160
Illustration 84 : Répartition des volumes prélevables par les classes de forages de 20 et 45 m ³ /h, selon les 4 grands secteurs géographiques de l'île.....	164
Illustration 85 : Calcul des volumes prélevables par unités, en ne comptabilisant que les forages prévisionnels de 45 et 20 m ³ /h.....	164
Illustration 86 : Conceptualisation du cycle de l'eau de la Martinique (état actuel).....	165
Illustration 87 : Répartition de la ressource en eau souterraine potentiellement exploitable par unité hydrogéologique	166

Liste des annexes

Annexe 1 Moyennes mensuelles de pluviométrie	177
Annexe 2 Données utilisées pour le calcul de la pluie efficace	181
Annexe 3 Cartes discrétisées fournies en entrée du modèle numérique	189
Annexe 4 Bilan hydrologique sur les bassins instrumentés	195
Annexe 5 Résultats détaillés des calculs de pluie efficace	199
Annexe 6 Sensibilité au paramètre β des débits simulés	207
Annexe 7 Débits spécifiques simulés sur la période 1987-1997	211
Annexe 8 Piézométrie simulée sur la période 1987-1997	215

1. Introduction

Le projet s'inscrit dans le cadre general de l'elaboration d'un « Systeme d'Information sur les ressources en eau souterraine de la Martinique » dont les objectifs sont :

- de contribuer à améliorer significativement la **connaissance regionale patrimoniale des ressources en eau souterraine**, necessaire pour leur protection, leur valorisation et leur suivi dans le cadre d'une gestion durable et respectueuse de l'environnement, conformement aux orientations du SDAGE de Martinique approuve en 2001,
- de s'inscrire dans le cadre du plan d'action pour repondre à la Directive Cadre Europeenne de 2000 en matiere de caracterisation des ressources en eau / volet « eaux souterraines »,
- de porter à connaissance les resultats synthetises au niveau regional, de facon à ce qu'ils puissent être utilises dans les projets specifiques de mise en valeur ou de protection des eaux souterraines

En effet, des situations de crises saisonnieres apparaissent de plus en plus frequemment en Martinique du fait du manque de ressource en eau destinee à l'Alimentation en Eau Potable (AEP), notamment en periode de carême sec. Du fait de l'augmentation previsible de la demande (demographie, developpement social et economique), voire du changement climatique, ces situations risquent de s'amplifier dans les annees à venir. Actuellement 92% de l'eau utilisee proviennent d'eau de surface (le reste provenant de sources). Pourtant, du fait de leurs caracteristiques qualitatives, de leur generalement bonne protection naturelle et de leur proximite des zones de consommation, les eaux souterraines constituent un complement interessant aux eaux de surface.

Ces ressources en eau souterraine pourraient être exploitees sous reserve d'une bonne appreciation des disponibilites quantitatives, qualitatives et des impacts de cette exploitation. Toutefois, si, comme ce travail le montre, la structure des aquiferes de Martinique est maintenant assez bien connue, au moins dans ses grandes lignes, du fait de leur exploitation encore tres marginale et de l'absence jusqu'à present (à l'exception des travaux en cours concernant l'aquifere du Lamentin ou celui de Fond Lahaye et de Case Navire à Schoelcher) d'etudes specifiques portant sur l'evaluation de la ressource exploitable à long terme au sein des aquiferes de Martinique, les ressources potentielles en eau souterraine sont encore mal connues.

La Region Martinique et le BRGM ont donc engage en 2005, avec le soutien de la Diren Martinique, un programme d'evaluation des ressources en eau souterraine de Martinique. L'objectif general de ce projet est de contribuer à améliorer significativement la connaissance regionale patrimoniale de l'aspect quantitatif des ressources en eau souterraine.

2. Elements d'hydrogéologie des milieux volcaniques

Le présent chapitre vise principalement à faire la synthèse des connaissances sur les aquifères volcaniques en général.

L'hydrogéologie est la discipline qui concerne l'étude des eaux souterraines.

Elle consiste à synthétiser l'ensemble des résultats acquis dans le cadre de disciplines variées (géologie, prospection géophysique, hydrodynamique, géochimie, etc.) en vue d'établir, de manière itérative si besoin, un modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement d'un système aquifère. Ce système sera l'unité de ressource sur la base duquel pourront être prises des décisions (en terme d'exploration, d'exploitation, de gestion, de préservation, etc. de la ressource), à l'instar du bassin versant pour les eaux de surface.

Ce chapitre présente successivement une description des propriétés hydrogéologiques des principaux types de formations volcaniques, puis une synthèse sur la structure et le fonctionnement des aquifères volcaniques.

2.1. GEOLOGIE – LITHOLOGIE DES FORMATIONS VOLCANIQUES

D'une manière générale, on distingue en France deux principaux types de formations volcaniques : le volcanisme à dominante **basaltique** et le volcanisme à dominante **andésitique**. Ces deux types sont à l'origine de produits volcaniques de nature sensiblement différente qui, par voie de conséquence, ont des propriétés hydrogéologiques qui diffèrent significativement.

2.1.1. Le volcanisme à dominante basaltique

Il est essentiellement représenté par :

- des **volcans boucliers**, mis en place directement sur le plancher océanique (intraplaque océanique) et ayant pour origine des points chauds. Ils montrent en général un volcanisme peu différencié, à dominante de coulées basaltiques. Les îles de la *Réunion* ou de *Mayotte* ainsi que la plupart des îles volcaniques de Polynésie résultent essentiellement de l'empilement de laves basaltiques, sur plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. Les coulées d'épaisseur unitaire en moyenne métrique, se sont en général mises en place sur des surfaces relativement planes et peu inclinées, formant des planèzes. Elles sont interstratifiées de paléosols et, de manière plus subordonnée, de formations pyroclastiques. Des produits plus différenciés (phonolites, néphélinites, ponces) se mettent parfois en place, sous forme d'intrusions ou de coulées et épanchements, souvent au sein de paléovallées, principalement lors de la fin des grandes phases

d'activité volcanique. Par ailleurs, certains édifices sont soumis à des processus de démantèlement qui concourent au dépôt, à leur périphérie, en particulier au sein de paléovallées, de formations sédimentaires, de type alluvial en particulier. Les îles les plus anciennes sont aussi affectées par des phénomènes de subsidence qui, en contexte tropical, se marquent par l'édification de ceintures coralliennes ;

- des **ensembles volcaniques à dominante basaltique**, d'épaisseur et d'extension variable, **mis en place en contexte continental**, et qui reposent de ce fait sur un substratum non volcanique (socle cristallin ou métamorphique, bassins sédimentaires). On distingue, selon la durée de leur activité :
 - Les ensembles présentant une histoire relativement courte (en métropole : la chaîne des Puys par exemple, avec une activité sur moins de 100 000 ans, la partie ouest du Velay, etc.) comportent des maars, résultant de l'interaction explosive entre une venue de magma et des eaux superficielles, des cônes de scories, situés à proximité des points d'émission, et des coulées, mises en place en général au sein de paléovallées. Ces deux derniers types de formations sont en général prépondérants. Des épaisseurs importantes de produits volcaniques (dans la chaîne des Puys en moyenne une centaine de mètres, localement plus de 200 m) sont ainsi rencontrées à l'aplomb de ces paléovallées qui entaillaient le substratum des formations volcaniques. Au droit des cônes, les épaisseurs peuvent aussi atteindre ou dépasser ces valeurs. Des produits plus différenciés (trachytes, phonolites, etc.) se mettent en place sous forme de dômes et de protrusions. Des formations sédimentaires (alluvions, tourbes, diatomites, etc.) et des paléosols constituent une partie du remplissage des paléovallées et des dépressions que forment les maars.
 - Les ensembles ayant fonctionné sur une période plus longue (plus de 5 Millions d'années pour le Devès par exemple) et/ou ayant émis de plus gros volumes de produits volcaniques sont caractérisés par des séries plus épaisses, ce qui a pu conduire à la constitution d'**entablements basaltiques**. Le Cézallier, l'Aubrac, la partie Est du Velay, les Coirons, l'Escandorgue dans le sud du massif central sont ainsi rattachés à ce volcanisme fissural de plateaux.

2.1.2. Le volcanisme de type andésitique

Les volcans de l'arc insulaire antillais résultent de la subduction de la plaque océanique nord-atlantique sous la plaque caraïbe. La Martinique, la Basse-Terre de Guadeloupe et une partie de son archipel (Saint-Martin, Saint-Barthélémy, Les Saintes) sont composées quasi exclusivement de formations volcaniques de type andésitique, d'âges tertiaire et quaternaire. Les formations sédimentaires y sont limitées aux alluvions récentes, aux formations de plage et de mangrove, et à quelques niveaux calcaires déposés lors de périodes prolongées d'arrêt du volcanisme.

Ces formations volcaniques sont très variées. Les hyaloclastites, formations témoins des phases initiales sous-marines du volcanisme, forment en général le soubassement des îles, sur plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. Alternent ensuite différents types de laves, depuis des termes assez fluides (basaltes, andésites basiques, représentés par exemple par le volcan bouclier du Morne Jacob en Martinique, les coulées

décamétriques de la Madeleine en Guadeloupe) jusqu'à des laves plus visqueuses (andésites, dacites, rhyolites). Les produits de nature explosive, nuées ardentes, ponces, cendres, etc., sont très représentés, en particulier au sein des édifices récents. Enfin, les formations de démantèlement (lahars, coulées de débris, produits d'effondrement de type « Mount Saint Helens », conglomérats, etc.) peuvent occuper de très grandes surfaces et combler des paléovallées larges et profondes.

Compte tenu de leur histoire longue (plus de 25 Ma pour la Martinique par exemple), majoritairement aérienne, polyphasée, affectée par la tectonique, par des phases de bombement, de subsidence et d'effondrement, d'érosion, etc., les îles andésitiques présentent une structure géologique complexe.

Les **stratovolcans** (les Monts du Cantal et le Mont Dore/Sancy dans le Massif Central, la Montagne Pelée en Martinique par exemple), constituent des édifices composites, mis en place sur une longue période (plus de 15 Ma pour le Cantal, environ 4 Ma pour le Mont Dore/Sancy), de manière polyphasée et couvrant des aires importantes (600 km² pour le Mont Dore/Sancy, 2 700 km² pour le Cantal). Ils présentent une structure complexe, marquée par une alternance de laves, en coulées et intrusions, et de formations pyroclastiques et de démantèlement. Ils ont aussi été affectés par des phases successives d'érosion et la formation de calderas.

2.1.3. Les îles volcaniques

Qu'elles soient à dominante basaltique ou andésitique, les **îles volcaniques** présentent la spécificité de s'être tout d'abord édifiées en milieu sous-marin puis, une fois émergées, en contexte aérien, avec parfois des récurrences (effondrements, édification de nouvelles parties, adjacentes à l'île principale). Des produits de type « aérien » dominant, en général, au sein des formations volcaniques les plus récentes, tandis que le soubassement des édifices est souvent constitué de formations de type hyaloclastique (volcanismes sous-marin). Par voie de conséquence, les formations géologiques observables à l'affleurement ne sont pas toujours représentatives de celles qui pourront être recoupées en profondeur par des forages, surtout lorsque ceux-ci sont profonds.

2.2. PROPRIETES HYDROGEOLOGIQUES DES PRINCIPAUX TYPES DE FORMATIONS VOLCANIQUES

2.2.1. Les laves

D'une manière générale, parmi les formations volcaniques, les laves sont les roches pouvant présenter les perméabilités les plus fortes.

Les laves présentent, en général, une très faible perméabilité de matrice. Leurs propriétés aquifères dépendent donc étroitement de leurs conditions de mise en place, de fissuration et de fracturation. Par ailleurs, comme pour l'ensemble des autres formations volcaniques, leur degré d'altération joue également un rôle important.

Les laves présentent ainsi une forte variabilité de leurs propriétés hydrodynamiques au sein d'une même coulée qui se traduit, en forage, par des variations de la perméabilité selon la verticale. Cette variabilité s'explique majoritairement par la structure interne des coulées, liée à leur mode de mise en place. Les coulées comprennent ainsi généralement, de haut en bas (Illustration 1) :

- une surface scoriacée montrant soit des gratons, soit un niveau scoriacé ;
- un cœur de coulée plus massif souvent diaclasé (fissures de refroidissement et/ou de flux) ;
- une brèche de base de coulée présentant des éléments scoriacés, en gratons, et reprenant fréquemment des blocs de la coulée sous-jacente.

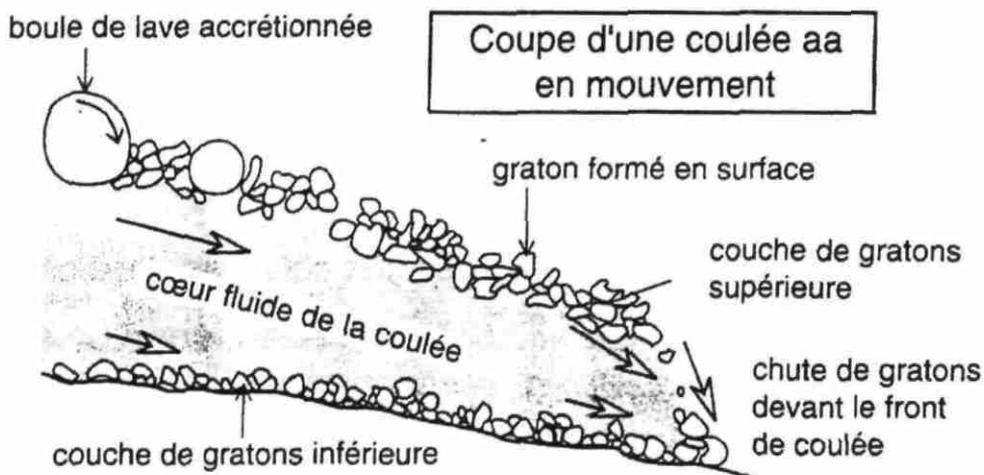


Illustration 1 : Coupe d'une coulée de type « aa » en mouvement

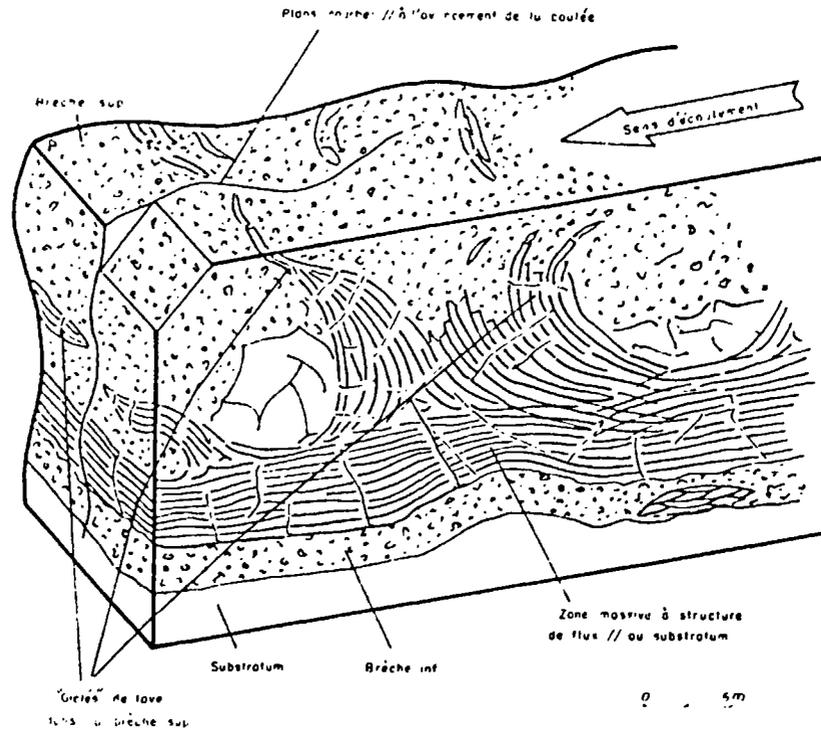


Illustration 2 : Schéma type d'une coulée andésitique, d'après Westercamp, 1972

L'écoulement de la lave est à l'origine de **figures de flux** qui se traduisent fréquemment par une fissuration de la roche et/ou un débit en plaquettes, souvent parallèle au substratum. Le **refroidissement** de la lave génère lui aussi une fissuration (prismation avec des fissures en général perpendiculaires à la surface de refroidissement). Ces processus confèrent aux laves des caractéristiques hydrauliques intéressantes surtout si cette perméabilité initiale est renforcée par une fracturation d'origine tectonique.



Illustration 3 : Andésite 2α présentant des figures du flux

L'**altération climatique ou hydrothermale** de la roche se traduit par une argilisation partielle ou totale de ses minéraux constitutifs qui oblitère, en partie ou complètement, une éventuelle perméabilité. L'altérabilité des différents faciès constitutifs d'une coulée est variable. Dans un schéma type de coulée à la lave relativement fluide, les faciès de bordure (brèches et scories des mur, toit et flancs de coulée) présentent, du fait de leurs porosité et perméabilité initiales, une plus forte aptitude à s'altérer rapidement que le cœur de l'écoulement, massif car refroidi lentement. Ainsi, un même ensemble lithologique peut constituer à la fois des niveaux aquifères (dans ses parties non altérées) et un substratum ou toit imperméables vis-à-vis des formations sus ou sous-jacentes (pour ce qui concerne ses parties argilisées).

En outre, les laves montrent souvent, du fait de la composition du magma qui est à leur origine, une forte viscosité. Celle-ci entraîne une **bréchification** de la roche lors de sa mise en place. Leur dépôt en contexte sous-aquatique génère également des faciès bréchiques. Dans ces conditions, la progression des fronts d'altération peut être beaucoup plus homogène et régulière.

Exemples :

À Mayotte, la synthèse des mesures de débit réalisées à l'avancement au cours d'une campagne de forages de reconnaissance montre que les cœurs de coulée de lave, lorsqu'ils sont fissurés, sont les faciès les plus productifs rencontrés au sein de ce type de formation géologique. En effet, même s'ils présentent une perméabilité similaire à celle des niveaux en gratons et scoriacés (médiane de $5 \cdot 10^{-5}$ m/s dans les deux cas), ils se distinguent de ces derniers par une épaisseur en règle générale plus importante au sein de chaque forage. L'ensemble de ces zones les plus perméables (horizons fissurés et niveaux scoriacés) présente néanmoins toujours une épaisseur modeste (quelques mètres à une dizaine de mètres tout au plus. Cf. Illustration 4a).

Dans certains ouvrages (Illustration 4b), la quasi totalité du débit du forage provient d'un seul horizon d'une épaisseur de quelques mètres (Lachassagne et *al.*, soumis). C'est par exemple aussi le cas du forage de Fond Lahaye (commune de Schoelcher, N° 1177ZZ0161) où l'horizon productif, d'une épaisseur d'environ 3 m, correspond très vraisemblablement à un niveau (scoriacé ?) de base de coulée (en Martinique, la plupart des forages étant relativement anciens, ils ont été réalisés avec des méthodes de foration ne permettant pas la localisation et l'identification géologique précise des niveaux perméables, ce qui explique le faible nombre d'exemples disponible).

Les coulées volcaniques peuvent aussi se révéler imperméables si elles sont massives et compactes (Illustration 4b). La productivité d'une coulée de lave n'est donc pas systématique et dépend des conditions de mise en place et de genèse de la coulée.

Concernant les coulées basaltiques, Custodio (1985) souligne l'anisotropie importante de ces formations avec un rapport de la perméabilité horizontale sur la perméabilité verticale allant de 20 à 50, et des circulations souterraines prépondérantes dans les plans horizontaux.

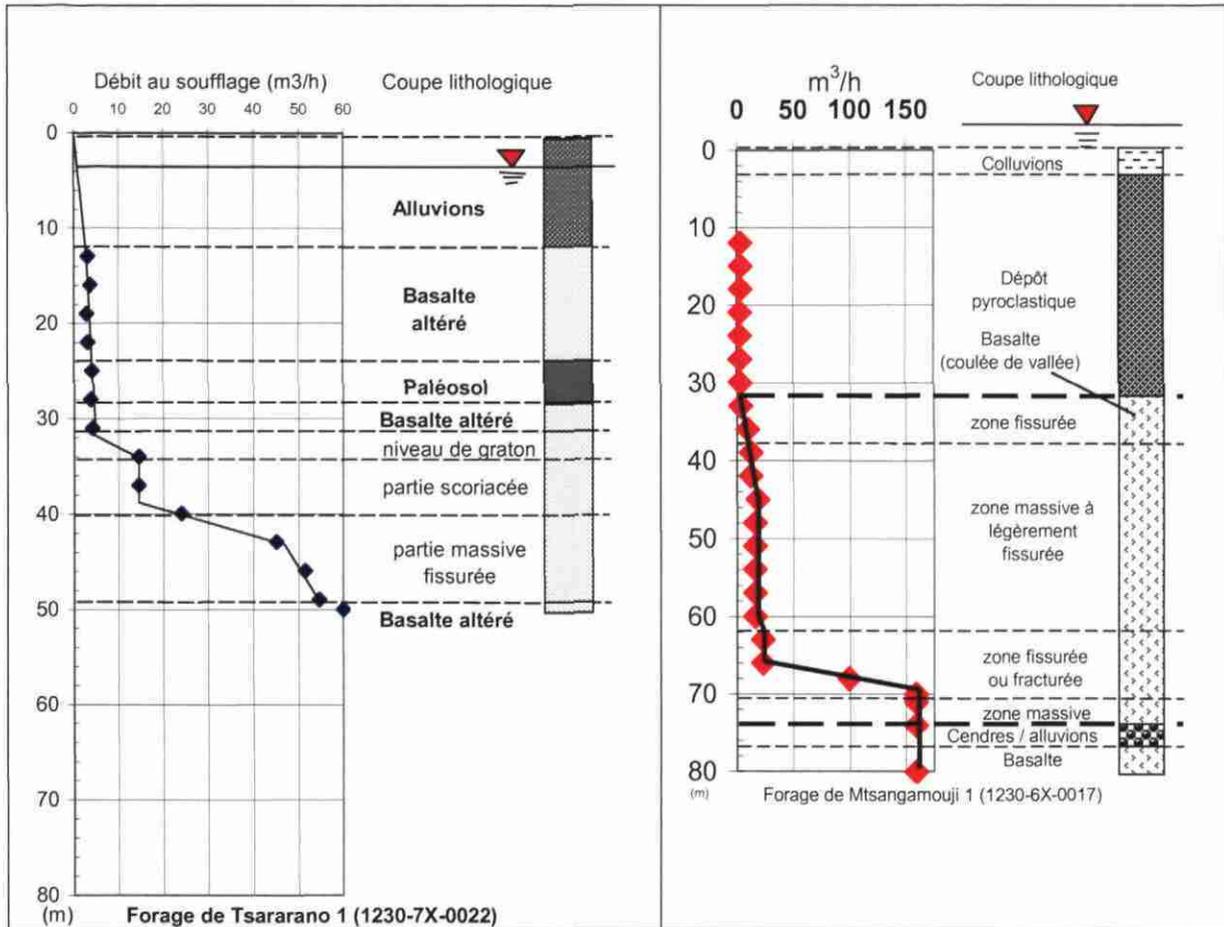


Illustration 4 : Forages de Tsararano 1 (a : à gauche) et de Mtsangamouji 1 (b : à droite) à Mayotte. Débits au soufflage à l'avancement et coupes lithologiques

2.2.2. Les pyroclastites

Les **nuées ardentes** (de type Péléen, Mérapi ou Saint-Vincent) sont à l'origine de dépôts constitués d'éléments lithiques juvéniles (résultant d'un magma amené récemment en surface, lors de l'éruption en cours), donc généralement sains, grossiers et meubles. Elles comportent en général une matrice cendreuse abondante (éléments de taille inférieure à 2 mm), des blocs anguleux (de taille décimétrique à plurimétrique) et des lapillis (éléments de taille comprise entre 2 et 64 mm), peu ou non vésiculés. Ce type de dépôt est donc caractérisé par une très forte hétérométrie. Il est généralement non ou mal classé.

Les matériaux constitutifs des nuées ardentes présentent donc une perméabilité d'interstices digne d'intérêt pour la prospection hydrogéologique, qui n'est pas remise en cause par leur très forte hétérométrie. Leur perméabilité peut parfois dépasser celle des laves.

Constituées essentiellement de produits juvéniles, ces formations s'altèrent en outre relativement lentement. Les zones axiales des écoulements sont plus pauvres en matrice cendreuse et présentent de ce fait généralement une plus forte perméabilité.

Les éruptions magmatiques qui président à la mise en place des nuées ardentes sont en règle générale précédées d'éruptions phréatiques qui remobilisent et pulvérisent des matériaux anciens. Les retombées associées génèrent des **niveaux cendro-sableux** d'épaisseur souvent faible (inframétrique) qui s'imperméabilisent à relativement court terme (altération) et constituent un substratum imperméable aux dépôts de nuées ardentes.

Les formations de type « nuées ardentes » forment donc fréquemment une succession de niveaux perméables (pouvant receler des imperméables relatifs interstratifiés) et imperméables, les derniers présentant en général une épaisseur plus restreinte. Par ailleurs, la conjonction axe de paléovallée (donc épaisseur plus importante de matériau) et faible proportion d'éléments fins (donc perméabilité initiale plus forte et moindre faculté à s'altérer) constitue un facteur intéressant pour le développement d'aquifères de bonne qualité. Les nuées ardentes constituent donc globalement des formations présentant de bonnes propriétés hydrogéologiques.

Les **coulées de ponces** sont en règle générale constituées de lapilli ponceux et de blocs emballés dans une matrice cendreuse. Des niveaux cendres séparent souvent les différentes unités d'écoulement qui sont la plupart du temps canalisées par le réseau hydrographique. Ces coulées peuvent être associées à des dépôts pliniens (retombées aériennes issues d'un panache ascendant à partir d'un cratère ouvert) qui se présentent sous la forme de lits stratifiés, à granoclassement normal, constitués de cendres, lapilli et petits blocs vésiculés. Ces dépôts, d'épaisseur d'autant plus réduite que l'on s'éloigne du point de sortie et de granulométrie fine, s'altèrent rapidement. Ils sont rarement préservés dans l'axe des vallées dans la mesure où ils sont entraînés par l'érosion. Les coulées de ponces présentent donc de plus faibles potentialités

hydrogéologiques que les dépôts de nuées ardentes, en particulier dans les secteurs où le climat humide conduit à leur rapide altération.

Les **tufs volcaniques** présentent une perméabilité de matrice en général médiocre, variant selon leur teneur en argiles héritées ou d'altération. Indurés et fracturés ou lorsqu'ils ont subi un remaniement, ils peuvent présenter localement de meilleures propriétés hydrodynamiques.

Exemples :

Les aquifères constitués de pyroclastites sont très développés au sein des formations émises par la montagne Pelée, en Martinique. Sur son flanc sud-ouest, les formations pyroclastiques, peu altérées, constituent des aquifères très productifs. La source Morestin (plus de 200 m³/h en étiage), et le forage « Pécoul » (exploitable à environ 70 m³/h), tous deux situés au Nord-Est de Saint-Pierre, constituent ainsi les deux principales sources d'approvisionnement du Syndicat des Communes de la Côte Caraïbe Nord-Ouest. Un ouvrage foré à Fond Canonville, entre Saint-Pierre et le Prêcheur, pourrait également être exploité à plus de 50 m³/h. Cet aquifère présente un fort hydrodynamisme et de bonnes propriétés de perméabilité, comme l'attestent des venues d'eau douce en mer, au Nord-Ouest de Saint-Pierre, ainsi que le caractère non pérenne des cours d'eau du flanc Ouest de la Montagne Pelée. A Pécoul, les observations réalisées au cours d'une récente campagne de sondages suggèrent cependant des caractéristiques relativement hétérogènes (secteurs plus perméables correspondant vraisemblablement à des variations granulométriques, soit originelles, soit postérieures à la mise en place de ces formations).

Les ponces et brèches de la plaine du Diamant en Martinique, peu altérées en raison du climat de ce secteur de la Martinique, présentent en général de relativement bonnes propriétés hydrodynamiques (transmissivité de l'ordre de 2.10^{-3} m²/s, coefficient d'emmagasinement voisin de 7 %). Les observations réalisées lors des sondages suggèrent ici aussi des caractéristiques relativement hétérogènes (secteurs plus perméables correspondant soit à des variations granulométriques, soit à de la fracturation). Dans ce secteur littoral, leur exploitation est par contre subordonnée à une connaissance précise des conditions de recharge et de la dynamique de l'interface eau douce - eau salée.

La zone de captage du ruisseau de Vourzac (Haute-Loire), qui est de première importance pour l'alimentation en eau potable de la ville de Puy-en-Velay, se situe au sein de tufs phréatomagmatiques interstratifiés dans le plateau basaltique du Devès (Massif central). Quatre émergences captées pour un débit total de 80 à 100 l/s y sont rassemblées sur moins d'un kilomètre carré (Boivin et Livet, 2001).

Les paramètres hydrodynamiques de pyroclastites cités dans la littérature sont synthétisés au sein du tableau suivant (Illustration 5). Ces résultats montrent la très forte variabilité des paramètres hydrodynamiques de ces formations qui peut être imputée à la fois aux caractéristiques originelles des roches (celles-ci présentant, comme indiqué plus haut, des faciès variés) et, notamment, à leur altération.

Auteurs	Formations	Lieu	Porosité efficace (-)	Porosité totale (-)	Perméabilité (m/s)
Davis (1974)	Tufs cendreux				10^{-10} à 10^{-7}
Schoeller (1962)	Tufs			30 %	
	Ponce			50 à 90 %	
d'Arcy et al. (1990)	Scories quaternaires	Chaîne des Puys	45 %	60 %	
Josnin et al. (2002)	Scories quaternaires	Chaîne des Puys	39 à 42 %	52 à 58 %	
Join (1991)	Scories récentes	Ile Réunion		60 %	2.10^{-2}

Illustration 5 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques des pyroclastites, citées dans la littérature (d'après Joux, 2002).

2.2.3. Les hyaloclastites

Ce sont des roches volcano-sédimentaires soit formées par l'accumulation directe de produits volcaniques fins émis en milieu sous-aquatique (hyaloclastites primaires), soit liées à la reprise de ceux-ci par les courants marins (hyaloclastites secondaires ou tuffites). Les hyaloclastites présentent donc des faciès variés :

- les faciès de retombée directe sont non classés et essentiellement constitués de lapilli massifs et scoriacés, emballés dans une matrice cendreuse grossière, indurée, de même nature ;
- les tuffites sont constituées d'alternances de bancs de microconglomérats, de grès fins et de silts pris dans un ciment calcaire ou argileux ;
- des faciès nettement plus grossiers, de caractère conglomératique voire de type « lahar », sont également représentés.

Des coulées de lave interstratifiées, fréquemment bréchifiées du fait de leur mise en place en contexte sous-marin, sont souvent associées aux hyaloclastites.

Ces formations présentent une faible perméabilité de matrice. Constituées d'éléments de lave de faible granulométrie, en général jointifs, elles sont dotées initialement d'une porosité d'interstices limitée, que diminuent encore les phénomènes de compaction et/ou d'altération (climatique ou hydrothermale), particulièrement actifs et efficaces sur les éléments de petite taille constitutifs de la roche.

La presence, en particulier au sein des facies primaires, de coulées de lave interstratifiées ainsi que la fracturation d'origine tectonique peuvent néanmoins leur conférer localement des propriétés aquifères acceptables.

2.2.4. Conglomerats et lahars

Les formations détritiques de type **conglomérat** sont, en général, caractérisées par un fort degré d'altération, les éléments du conglomérat eux-mêmes étant souvent déjà altérés lors de leur mise en place (comme l'illustrent souvent des figures de desquamation en pelures d'oignon). Ils présentent donc de faibles potentialités.

Ainsi, dans la région Nord-Atlantique de la Martinique, les conglomérats jouent souvent un rôle de substratum imperméable vis-à-vis des laves aquifères sus-jacentes, avec localisation de sources à l'interface laves/conglomérats.

Les **lahars** sont des brèches non classées, hétérogènes, à forte composante terrigène. La matrice argilo-sableuse abondante qui les caractérise est à l'origine de leur faible perméabilité.

Seule la conjonction d'une faible argilisation et d'une fracturation importante serait susceptible de conférer localement des propriétés aquifères à ces formations.

2.3. STRUCTURE DES AQUIFERES VOLCANIQUES

2.3.1. Hétérogénéités à toutes les échelles

Les formations volcaniques présentent une structure géologique fréquemment complexe, liée à des hétérogénéités à toutes les échelles :

- **à l'échelle cartographique**, la dynamique active de mise en place de ces formations concourt à une forte variabilité spatiale, latérale et verticale (tectonique, subsidence, paléovallées emboîtées, etc.), des formations géologiques volcaniques (Illustration 6). Des formations perméables et imperméables peuvent ainsi coexister à cette échelle ;
- **à l'échelle d'une formation donnée**. Au sein de laves par exemple, les différentes coulées, d'épaisseur très limitée, peuvent être séparées par des paléosols isolant différents niveaux perméables. Au sein d'une même paléovallée, les laves sont fréquemment interstratifiées de formations alluviales (dont la perméabilité est variable selon les cas) ou de démantèlement (lahars, conglomérats, en général peu perméables) ;
- **à l'échelle d'un même ensemble lithologique**, considéré globalement comme perméable, coexistent des niveaux très perméables et d'autres quasiment imperméables. Ainsi, au sein de coulées basaltiques (Illustration 4), les faciès en gratons, scoriacés et fissurés sont susceptibles d'être très perméables tandis que les parties massives ne sont pas productives ; ces niveaux ou formations peu perméables, ainsi que les pendages originels parfois forts des coulées, peuvent générer une structure en « tuiles ». La présence, au sein de hyaloclastites, considérées globalement comme peu perméables, de petites coulées de lave, peut augmenter significativement la productivité globale de ces formations. La présence d'intrusions (dykes en particulier) peut contribuer à un compartimentage des aquifères ou, dans certains cas, peut conférer une certaine perméabilité à des ensembles peu perméables.

2.3.2. Types de perméabilité

Au sein des aquifères volcaniques, coexistent perméabilité de fissures et perméabilité d'interstices.

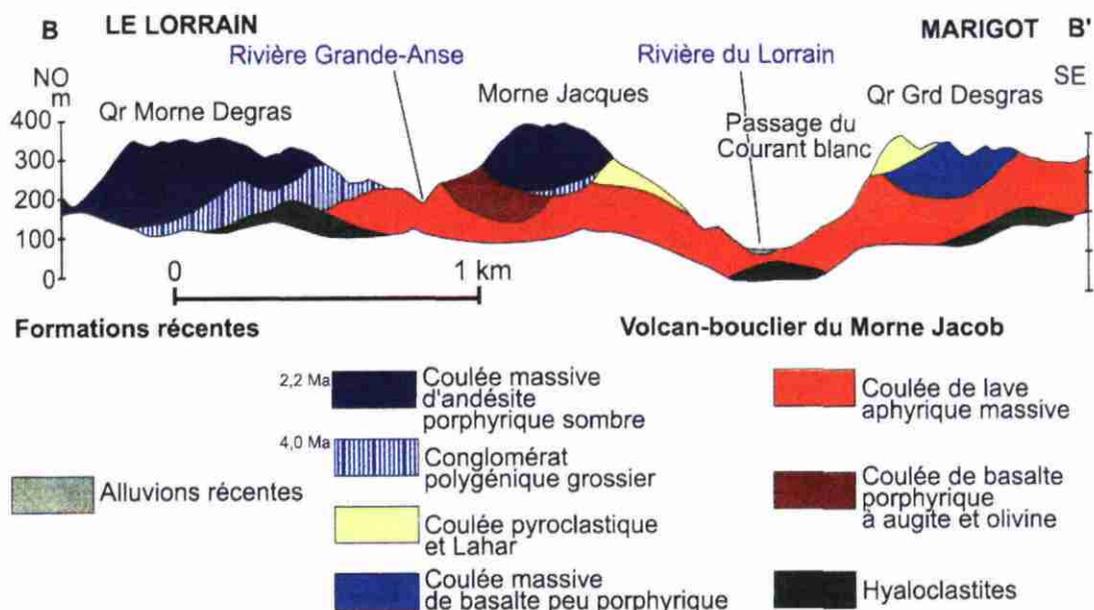


Illustration 6 : Exemple de la variabilité spatiale des formations volcaniques à l'échelle cartographique. Structures en paléovallées radiales par rapport à l'édifice du volcan bouclier du Morne Jacob (d'après la carte géologique de la Martinique au 1/50 000).

La **perméabilité d'interstices** s'exprime dans différents contextes :

- au sein des formations basaltiques scoriacées : par les cônes de scories, lorsqu'ils ne sont pas altérés, par les niveaux scoriacés (en « gratons ») de toit et de base de coulée. Dans ce dernier cas, la porosité peut parfois être très grossière, avec des vides de taille centimétrique, voire même décimétrique. Ainsi, les coulées d'andésite basique de la Madeleine, en Guadeloupe, d'épaisseur pluridécamétrique, montrent des sources à très fort débit qui émergent, en front de coulée, au sein de blocs de taille décimétrique à plurimétrique, refroidis sur le toit de la coulée et tombés à son front lors de sa mise en place, et sur lesquels elle s'est épanchée à la manière d'un bulldozer sur sa chenille ;
- au sein des formations pyroclastiques : ponces, nuées ardentes, hyaloclastites, tuffites, etc. lorsqu'elles ne sont pas soudées à chaud ou altérées ;
- au sein des formations sédimentaires, des alluvions pour l'essentiel, associées aux laves, en particulier au sein des paléovallées. En Martinique, les formations alluviales (anciennes ou actuelles) présentent en général une faible perméabilité du fait de la présence en leur sein d'une fraction argileuse importante.

La **perméabilité de fissures** est présente aussi bien au sein :

- des laves basiques (basaltes), essentiellement sous la forme de fissures de refroidissement, bien connues lorsque la fissuration se traduit par un débit en orgues. Certaines de ces fissures peuvent atteindre une grande ouverture de l'ordre de plusieurs centimètres à décimètres ;

- que des laves acides (plus visqueuses), où elle s'exprime surtout sous la forme de figures d'écoulement (figures de flux pouvant conférer aux laves un débit en plaquettes, d'épaisseur centimétrique).

Exceptionnellement, la présence de tunnels de laves (au sein de basaltes fluides), de troncs de végétaux décomposés ultérieurement à la mise en place de la formation qui les a fossilisés (lahars, cendres, etc.) concourent aussi à la perméabilité des roches volcaniques et, parfois, à l'émergence de sources. Au contraire, l'existence de structures localisées, imperméables, peut contribuer à compartimenter l'aquifère ; en particulier, des faisceaux de dykes imperméables, des intrusions massives et le métamorphisme associé.

Perméabilité de fractures

À ces hétérogénéités dépendant de la lithologie des formations volcaniques peut être associée une variabilité spatiale de leurs propriétés hydrodynamiques liée à leur **fracturation** d'origine tectonique. Ce type de perméabilité, s'il est fréquemment invoqué, est souvent difficile à prouver de manière formelle (cf. Illustration 4b où l'origine de la perméabilité est discutée : fissuration ou fracturation).

2.3.3. Altération

Les processus d'altération contribuent eux aussi à l'hétérogénéité de ces milieux en participant à la diminution de la perméabilité des roches (principalement du fait de leur argilisation et de la précipitation de minéraux secondaires). L'altération météorique d'une part, dont l'action est particulièrement importante sous les climats de type tropical humide, et l'altération hydrothermale d'autre part, exacerbent ainsi les hétérogénéités décrites plus haut.

L'**altération météorique** est particulièrement marquée lors de phases prolongées d'exposition des formations volcaniques en surface. Les profils d'altération associés peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur et sont alors structurés dans l'espace (surfaces ou paléosurfaces d'altération). Lorsqu'elle s'exerce sur de courtes périodes, l'altération affecte les formations sur de faibles épaisseurs (décimétriques à métriques) et concourt à la formation de « paléosols » que l'on retrouve ensuite interstratifiés au sein des formations volcaniques.

L'**altération hydrothermale** est liée principalement à des circulations de fluides chauds au sein des roches. Elle est donc particulièrement fréquente en contexte volcanique.

Elle s'exprime à différentes échelles :

- celle de l'édifice volcanique dans son ensemble, avec une plus forte occurrence au sein de la partie centrale des édifices que dans leur périphérie (cf. § 2.4.1) ;
- celle de chaque formation volcanique, en raison de la chaleur héritée de sa mise en place. Sont plus particulièrement concernées les formations mises en place à

haute température (laves notamment) ou interstratifiées entre des formations mises en place à haute température ;

- celle de structures spécifiques en général sécantes aux formations concernées : intrusions, zones de fractures constituant le lieu privilégié de circulations de fluides chauds, etc..

Ainsi, des formations qui, saines, apparaissent comme très perméables (faciès perméables de coulées, scories, etc.) peuvent s'avérer très peu perméables après une phase d'altération.

L'altération différentielle (alternances de niveaux ponceux, rapidement altérés, et de nuées ardentes, comme sur le flanc est de la Montagne Pelée par exemple, ou au sein du massif du Mont Dore - Sancy) peut conférer aux aquifères une structure de type « sandwich » alternant formations perméables et formations peu à très peu perméables.

2.4. FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES VOLCANIQUES

La connaissance des modalités de fonctionnement des différents types d'aquifères volcaniques est assez variable. Elle est meilleure pour les aquifères à la structure relativement simple et/ou exploités de manière intense (chaîne des Puys, certains secteurs de l'île de la Réunion par exemple), que pour les ensembles volcaniques à la structure plus complexe et/ou peu ou pas exploités (volcans andésitiques, Mayotte, Aubrac, Martinique, etc.). En outre, la structure des aquifères est en général mieux connue, grâce aux travaux de forage, que leurs modalités de fonctionnement, qui requièrent des approches plus onéreuses : pompages d'essai de longue durée, suivis piézométriques ou du débit des sources et des cours d'eau à long terme, géochimie, etc...

Comme conséquence de l'hétérogénéité des formations volcaniques, leurs modalités de fonctionnement sont très variables d'un type de formation volcanique et d'un contexte à un autre.

2.4.1. Îles volcaniques basaltiques

Les potentialités en eau souterraine des îles volcaniques de type basaltique sont généralement considérées comme présentant une corrélation négative avec l'âge des formations qui les composent, les plus récentes présentant de bien meilleures capacités que celles qui ont été longuement affectées par l'altération (Cruz and Silva, 2001 ; Peterson, 1992). Cette tendance est également notée à l'échelle des formations volcaniques d'une même île (Custodio *et al.*, 1988 ; Jawaheer and Proag, 1988).

Leur structure hydrogéologique (Illustration 7) est conceptualisée selon deux principaux types de modèles (Cruz and Silva, 2001 ; Lachassagne *et al.*, soumis ; Violette *et al.*, 1997) : le **modèle hawaïien ou réunionnais** (Izuka and Gingerich, 2003 ; Macdonald *et al.*, 1983 ; Peterson, 1992 ; Stieltjes *et al.*, 1988) et le **modèle des îles Canaries** (Custodio, 1975 ; Custodio, 1978 ; Custodio *et al.*, 1988).

• Le modèle hawaïien ou réunionnais

Le principal aquifère est une « **nappe de base** » qui s'écoule au sein de l'empilement de coulées, de faible épaisseur unitaire (métrique), très perméables (perméabilité horizontale en général supérieure à 10^{-3} m/s), dépourvu de dykes, qui constitue le volcan bouclier. Son exutoire principal se situe en mer. La nappe de base est, de ce fait, en équilibre avec les eaux marines (elle est également drainée par quelques sources, dans des zones de fort encaissement des ravines). Cette nappe montre de faibles gradients hydrauliques et donc des niveaux piézométriques peu élevés, même à une distance relativement importante du littoral. Faute de forages très profonds, la continuité de la nappe vers l'intérieur des terres reste hypothétique. En tout état de cause, le cœur de l'édifice est probablement très peu perméable en profondeur en raison de son colmatage par hydrothermalisation.

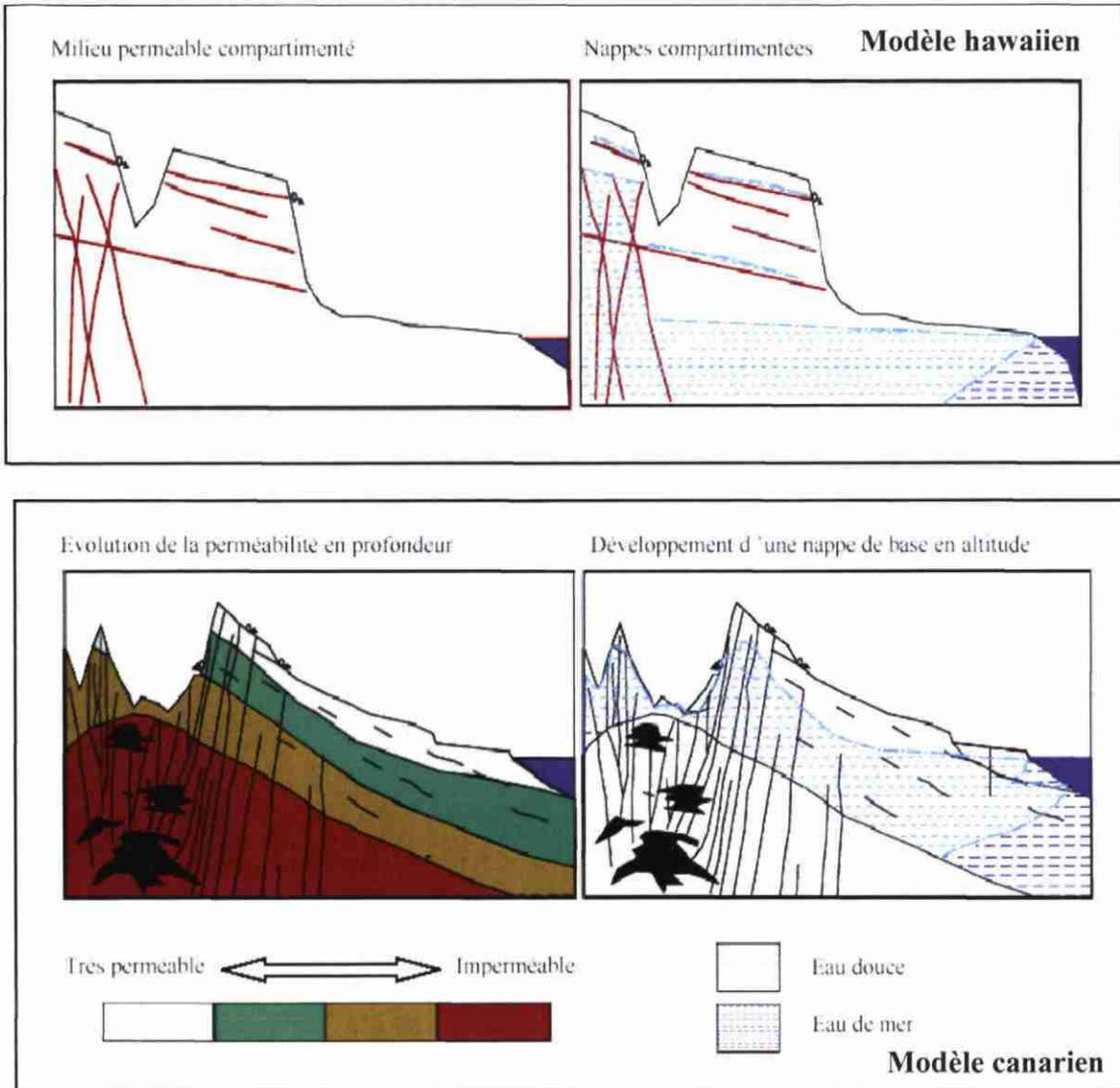


Illustration 7 : Schématisation des modèles hydrogéologiques hawaïen et canarien (d'après Folio, 2001).

La partie interne des îles présente des « **nappes perchées** » (Join et Coudray, 1993) (Illustration 7), déconnectées de la nappe de base et d'un volume nettement plus réduit que celle-ci. Alors que les sources drainant la « nappe de base » sont généralement pérennes avec des débits importants, celles des nappes d'altitude sont fréquemment temporaires avec des débits généralement très variables (Join et Coudray, 1993).

Les nappes perchées presentent deux origines distinctes, qui ne coexistent en general pas : d'une part, la structure en « sandwich » des aquiferes et d'autre part, la presence de dykes.

La structure en sandwich des aquiferes est due a l'alternance de niveaux volcaniques perméables (niveaux scoriacés inter-coulées, laves fissurées) et imperméables (partie massive des coulées, cendres, paléosols, niveaux altérés, etc.). Selon leur géométrie, on distingue les nappes perchées étendues et les nappes perchées chenalisées (Join et Coudray, 1993).

Les dykes, plus présents a Hawaii qu'a la Réunion, sont aussi a l'origine de nappes perchées dans la mesure où ils jouent en general un rôle de barrière étanche et assurent ainsi le compartimentage des aquiferes (Jackson and Lenat, 1989 ; Tabasaki and Mink, 1983). Ceci se traduit par des gradients piézométriques apparents très élevés (Shettigar, 1984) et, par voie de conséquence, par des niveaux piézométriques fréquemment proches de la surface du sol. L'orientation relative des dykes par rapport a celle du réseau de drainage conditionne l'efficacité de l'effet de barrage associé (Guillen, 1984). Par ailleurs, du fait de leur plus forte résistance mécanique, les secteurs fortement injectés de dykes se situent souvent en altitude, dans les zones les plus arrosées des îles, et constituent de ce fait des zones de recharge privilégiée.

Les nappes perchées contribuent *pro parte* a l'alimentation de la nappe de base, par l'intermédiaire d'écoulements au sein de la zone non saturée qui leur est sous-jacente.

Un modèle d'écoulement des eaux souterraines a été proposé pour l'île de La Réunion (Illustration 8), généralisable aux volcans boucliers basaltiques (Stieltjes *et al.*, 1986).



Illustration 8 : Modèle hydrogéologique schématique de l'île de la Réunion (d'après Stieltjes et al., 1986)

• Le modele des îles Canaries

Le modele des îles Canaries (Custodio, 1975 ; Custodio, 1978 ; Custodio *et al.*, 1988) est caracterise par un aquifere continu allant de la partie basale jusqu'à la partie interne et superieure de l'île (Illustration 7). Ce type d'îles peut ainsi être schématiquement assimilé, à cette échelle, à un massif poreux peu perméable, tout particulierement dans le sens perpendiculaire au littoral. Cette faible perméabilité est principalement associée à la presence de dykes dont l'orientation dominante est radiale par rapport à l'édifice (parallèle à la côte) et à la presence d'un noyau plus ancien, altere, moins perméable, recouvert de matériaux volcaniques modernes à perméabilité relativement grande. Ainsi, de ce fait, les perméabilités semblent beaucoup plus élevées dans les zones cōtières que dans la partie intérieure de l'île où le rapport entre la perméabilité horizontale et la perméabilité verticale est voisin de 50. D'une manière générale, les gradients piézométriques sont forts : de l'ordre de 5 à 15 %. Il n'y existe pas de source importante.

Ces deux modèles caracterisent tous deux un fonctionnement hydrogéologique « en grand », à l'échelle de l'ensemble de chaque île.

• Résultats complémentaires plus récents

Sur le massif du Piton de la Fournaise à la Réunion, une estimation de la perméabilité des formations anciennes a été obtenue à l'aide d'une approche combinant des analyses géologiques et des mesures locales de la conductivité hydraulique. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un appareillage spécifique, portable, permettant des injections d'air comprimé en milieu non saturé (Folio, 2001). L'ensemble des valeurs obtenues montre clairement une diminution progressive de la perméabilité en fonction de la profondeur et de l'âge des terrains. Ces mesures permettent de proposer un schéma inédit d'évolution verticale de la perméabilité dans le massif de la Fournaise. Cette distribution verticale de la perméabilité, pressentie par Join (1991) pour le Piton des Neiges, est supposée permettre le développement d'un niveau de saturation régional et continu qui remonte à de relativement hautes altitudes au centre du massif (1 500 m d'altitude environ pour une surface topographique culminant vers 3 000 m).

Un indice fort de l'existence d'un tel hydrosystème est donné par les prospections géophysiques menées au cours de ce travail de thèse à l'aide de la méthode CSAMT (Controlled Source Audio Magneto Tellurics). Des approches par simulations hydrodynamiques directes et inverses ont aussi été mises en œuvre sur la base de modèles en 2D vertical, 2D horizontal et finalement 3D, à l'aide d'une distribution de la perméabilité à petite échelle compatible avec les propositions récentes concernant l'évolution volcano-structurale de la Fournaise. Cette diminution de la perméabilité des terrains avec la profondeur, qui contribue à relever la piézométrie générale dans la Fournaise, peut être mise en relation avec l'occurrence de phénomènes mécaniques (compression lithostatique) et chimiques (minéralisation secondaire) qui peuvent être considérés comme universels quel que soit le type de volcan bouclier considéré. Sur cette base, le schéma hydrogéologique conceptuel, défini pour la Fournaise et transposable au cas du massif du Piton des Neiges (Join, 1991), est proposé par Folio (2001) comme modèle général d'écoulement et de perméabilité dans les milieux

volcaniques insulaires, ce que semblent confirmer les prospections géophysiques les plus récentes, menées sur d'autres volcans (Fogo, Karthala).

En ce sens, cette nouvelle conceptualisation hydrogéologique des volcans boucliers de type Réunion-Hawaii se rapproche de celle proposée pour les îles Canaries. La principale différence entre les deux modèles porte sur l'origine de la diminution de la perméabilité vers le cœur de l'île :

- uniquement liée à la compaction et surtout à l'hydrothermalisation des roches dans le cas de la Réunion-Hawaii ;
- également liée à la présence de dykes concentriques dans le cas des Canaries.

Des travaux récents (Frissant et al., 2007) concourent néanmoins à proposer un modèle significativement plus complexe, à la fois pour les aquifères d'altitude et pour la nappe de base, au moins pour les volcans boucliers relativement anciens (type Piton des Neiges à la Réunion). Ce modèle prend notamment en considération, au sein même du volcan bouclier, la présence de structures hydrogéologiques donnant lieu à d'importantes sources pérennes. Ces structures sont liées notamment au caractère polyphasé de la mise en place des formations volcaniques, qui conduit à l'individualisation de formations aquifères reposant sur des substratums moins perméables.

Par ailleurs, d'autres résultats (Lachassagne *et al.*, soumis) suggèrent que la structure hydrogéologique de **Mayotte**, autre île volcanique de type basaltique, apparaît comme très nettement différente de celle des deux modèles « Hawaii-Réunion » et « Canaries ». Il ne semble ainsi aucunement envisageable de proposer, pour Mayotte, un fonctionnement hydrogéologique en grand, à l'échelle de l'ensemble de l'île ou, tout au moins, de parties importantes de celle-ci. Cet état de fait semble pour l'essentiel lié à la structure géologique de cette île basaltique ancienne dominée, en subsurface (premières centaines de mètres) non pas par un empilement de coulées de lave peu épaisses (ancien volcan bouclier), mais par des coulées puissantes, mises en place au sein de plusieurs générations de paléovallées emboîtées, elles mêmes creusées aux dépens d'un ancien volcan bouclier dont les formations constitutives sont généralement peu perméables (hydrothermalisation). De plus, les coulées plus récentes sont fréquemment interstratifiées de pyroclastites faiblement perméables.

Ainsi, les formations anciennes du volcan bouclier sont peu représentées en subsurface. Elles apparaissent comme relativement peu perméables, en raison principalement de leur hydrothermalisation et de l'altération d'origine climatique. D'une manière générale, les laves plus récentes sont nettement plus perméables. Elles sont cependant très compartimentées du fait d'hétérogénéités à différentes échelles : substratum ancien imperméable, intercoulées eux aussi peu perméables, tuilage entre différentes coulées, etc. Il en résulte une alternance de faciès perméables, voire localement très perméables, et de faciès peu perméables, dont la composition hydrodynamique en série concourt à une perméabilité globale médiocre et, par voie de conséquence, à des aquifères compartimentés et à des niveaux piézométriques discontinus et quasi systématiquement proches de la surface topographique.

Par rapport aux volcans boucliers plus récents, à Mayotte, le compartimentage à l'échelle de chaque coulée s'explique par l'épaisseur plus importante des coulées unitaires (quelques dizaines de mètres d'épaisseur en moyenne, contre quelques mètres seulement dans les volcans boucliers plus récents). Ce comportement spécifique des îles basaltiques anciennes a été identifié par ailleurs, au sein de parties de certaines îles de l'archipel d'Hawaii (Izuka and Gingerich, 2003 ; Izuka, 2003).

2.4.2. Îles volcaniques andésitiques et stratovolcans

Les îles volcaniques andésitiques et les stratovolcans andésitiques, tels ceux de l'arc des Petites Antilles, du fait de la nature des magmas à leur origine, comportent une gamme de roches beaucoup plus variée que les îles basaltiques et, par voie de conséquence, des perméabilités très variables elles aussi. Cet état de fait concourt rarement à pouvoir considérer qu'elles ont un fonctionnement « en grand », comme cela a été décrit ci-dessus dans de nombreux contextes insulaires basaltiques.

Ainsi, des configurations très variées de fonctionnement coexistent, depuis des situations localement proches de celles rencontrées au sein des laves basaltiques, jusqu'à des configurations de roches peu à très peu perméables.

Des sources à fort débit (plusieurs dizaines de m³/h en étiage), issues de paléovallées et/ou liées à des structures fracturées, existent ainsi tant en Martinique (dacites des Pitons du Carbet, nuées ardentes de la Montagne Pelée, etc.) qu'en Guadeloupe (andésites basiques du Sud de la Basse Terre par exemple). Les contextes où la structure est plus complexe (absence de paléovallées bien individualisées ou fort morcellement des paléostructures par la topographie actuelle, absence de substratum imperméable, faible perméabilité des formations géologiques, etc.) conduisent à l'émergence de nombreuses sources aux débits moyens à faibles.

Le fonctionnement de nappes potentiellement de grande taille (nappe de la Plaine du Lamentin en Martinique par exemple), dont l'intérêt stratégique en terme de ressource en eau est important, reste à comprendre : structure exacte de l'aquifère (géométrie verticale et latérale, rôle des différentes lithologies, de la fracturation d'origine tectonique, etc.), structure exacte des formations semi-perméables associées, qui peuvent jouer un rôle capacitif ; modalités de recharge, d'échange avec les eaux de surface (alimentation de l'aquifère, soutien du débit des cours d'eau, etc.), de relations avec les versants, dynamique de l'interface eau douce/eau salée, au niveau des zones de comblement quaternaire et de mangrove en particulier, etc. Il n'est ainsi pas encore démontré que l'on puisse considérer ce type d'ensemble comme un unique et même aquifère. Des investigations en ce sens sont actuellement en cours, notamment sous l'égide de la CACEM.

2.5. INTRODUCTION AUX BILANS HYDROLOGIQUES ET A LA MODELISATION

Les eaux souterraines constituent une ressource de subsurface, dont l'exploitation peut engendrer des impacts environnementaux (diminution du debit de sources, de cours d'eau en etiage, etc.). Des lors, au stade de la prospection, il est necessaire de s'assurer que la quantite d'eau souterraine disponible (la « ressource renouvelable » en regle generale) peut assurer une exploitation de la ressource repondant aux besoins tout en respectant certains criteres environnementaux.

2.5.1. Bilan hydrologique

Les eaux souterraines, capturees apres un temps de parcours variable selon les structures hydrogeologiques (de quelques jours a plusieurs millenaires), sont alimentees par l'infiltration des eaux de surface (precipitations, rivières, lacs...). Des lors, au stade d'une prospection hydrogeologique et dans la perspective d'une exploitation dans les regles de la gestion durable, un premier ordre de grandeur de la ressource exploitable pourra etre evalue en estimant le bilan hydrologique du bassin versant concerne par l'exploitation projete d'eau souterraine.

La connaissance du bilan hydrologique permet d'identifier et de quantifier les differents termes du cycle de l'eau : precipitations, evapotranspiration, ruissellement, infiltration vers les nappes aquiferes et variations de stock en constituent les principales composantes. L'analyse manuelle ou par traitement du signal de series chronologiques de donnees meteorologiques et hydrometriques (debit a l'exutoire du bassin) et/ou piezometriques, permet une premiere estimation satisfaisante du bilan hydrologique. Elle permet aussi une premiere evaluation des eaux disponibles pour l'infiltration vers les nappes aquiferes. Il convient toutefois d'etre prudent sur ce point. L'infiltration efficace rejoindra dans un premier temps les aquiferes superficiels. Quant a l'alimentation de reservoirs plus profonds, celle-ci depend de la structure geologique du sous-sol, et en particulier de l'evolution de la permeabilite avec la profondeur, mais aussi et surtout de la distribution des charges hydrauliques. Une diminution de permeabilite avec la profondeur et l'age des formations (comme le suggere Folio, 2001) limitera les circulations d'eau profondes et induira des circulations superficielles vers des emergences locales. **L'estimation de l'infiltration efficace donnera une premiere idee des quantites d'eaux disponibles pour l'infiltration** et permettra ainsi d'estimer les volumes exploitables de maniere perenne au sein de l'aquifere. En general, afin de limiter les impacts environnementaux, l'exploitation est tres significativement inferieure aux volumes ainsi estimes (recharge naturelle).

Par ailleurs, l'exploitation des aquiferes genere en general des modifications des directions d'ecoulement des eaux souterraines qui, dans certaines configurations, sont susceptibles d'augmenter les apports d'eau au sein de l'aquifere, par exemple en rechargeant l'aquifere en periode de hautes eaux (saison des pluies). L'evaluation de la recharge naturelle telle qu'evoquee ci-dessus peut alors constituer une estimation par defaut de la ressource reellement exploitable au sein de l'aquifere.

En fait, seule une connaissance précise du fonctionnement de l'hydrosystème en question, en conditions d'écoulement naturelles et influencées (par pompage par exemple) est susceptible de permettre de quantifier les volumes exploitables en son sein et de définir les impacts environnementaux de cette exploitation. En règle générale, ces prévisions (et l'optimisation de l'exploitation) se font au moyen de modèles mathématiques permettant de simuler la structure et le fonctionnement des hydrosystèmes considérés.

Les études géochimiques sont par ailleurs utiles pour déterminer la composition chimique (substances dissoutes), l'origine et les temps de transit de l'eau. Ces données sont d'un grand apport pour contraindre les travaux de modélisation évoqués ci-dessus.

Dans les îles exposées au vent, les conditions climatiques sont fortement dépendantes de l'altitude et de l'exposition du versant : les précipitations augmentent considérablement avec l'altitude. La côte au vent est abondamment arrosée tandis que la côte sous-le-vent présente un déficit en eau très prononcé.

2.5.2. Modélisation mathématique – Gestion active des aquifères

Au stade de l'exploitation et de la gestion, un bilan hydrogéologique ne suffit plus en terme de gestion de la ressource et d'estimation de débit exploitable (Bredehoeft, 2002). Une **modélisation mathématique** permettra de prendre en compte la dynamique des écoulements et des échanges avec l'extérieur (en particulier avec la mer en contexte insulaire) et de leur modification en fonction du débit d'exploitation. Le modèle permettra donc de simuler différents scénarios d'exploitation ainsi que leurs effets sur l'environnement. Il permet ensuite de définir un débit exploitable par consensus entre les différents utilisateurs de la ressource en eau et/ou acteurs sur lesquels l'exploitation d'un aquifère a des effets directs ou indirects. Ces modèles mathématiques doivent prendre en compte les couplages densitaires de façon à simuler correctement les effets liés aux interactions avec l'eau de mer (biseau salé le long des côtes).

Outre des outils de gestion, les modèles mathématiques constituent également des outils de compréhension des processus physiques, comme cela a été précédemment fait dans l'île volcanique hawaïenne de Kilauea (Ingebritsen and Scholl, 1993) ou au Piton de la Fournaise sur l'île de La Réunion (Violette *et al.*, 1997). Ainsi, la simulation des écoulements souterrains sur un site et sa comparaison (validation) avec des observations (piézométrie, débits, géochimie, profils de température le cas échéant ...) permet de valider un modèle conceptuel de fonctionnement d'un site hydrogéologique. Elle peut permettre le cas échéant, de rejeter des hypothèses de travail et d'en renforcer d'autres.

A titre d'exemple, la modélisation inverse du champ hydraulique du Piton de la Fournaise a permis de mettre en évidence la décroissance de perméabilité avec la profondeur (Folio, 2001).

Afin d'optimiser l'exploitation d'eaux souterraines, on pratique généralement la **gestion active**. Pour des eaux souterraines peu profondes, sensibles aux saisons climatiques et en relation avec des eaux de surface (précipitations, cours d'eau), elle peut consister à assurer un état de remplissage minimal de l'aquifère en fin de saison sèche (en tout état de cause un état de remplissage inférieur à ce qu'il serait si l'aquifère n'était pas exploité) afin d'augmenter sa recharge en saison des pluies (en réduisant notamment les débordements de nappe qui se seraient produits si l'aquifère avait été plus rempli en fin de saison sèche) et ainsi augmenter la ressource exploitable. Une gestion active de la réserve peut aussi être opérée en rechargeant la nappe au moyen d'injections d'eau à partir de la surface (en forage, par des bassins d'infiltration, etc.) : c'est la recharge dite artificielle.

3. Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie de la Martinique

Les aquifères de Martinique résultent quasi exclusivement (à l'exception de quelques formations sédimentaires) d'un volcanisme de type andésitique mis en place en contexte insulaire. Dans les chapitres ci-dessous, le contexte géologique de la Martinique sera présenté, pour ensuite faire place aux caractéristiques hydrogéologiques des aquifères présents au sein de ces formations.

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIE

La Martinique, dont les terrains les plus anciens actuellement visibles à l'affleurement sont datés de la fin de l'oligocène (25 millions d'années environ), s'est édifiée en alternant phases d'activité volcanique et périodes de repos pendant lesquelles la sédimentation calcaire a pu se développer. Les matériaux émis au cours des premières constituent le bâti et tous les reliefs de l'île. Les formations calcaires liées aux secondes se présentent sous la forme d'affleurements discontinus, d'épaisseur et d'extension limitées, intercalés au sein des dépôts volcaniques ou les coiffant. Les principales unités géologiques de l'île résultent donc de plusieurs phases majeures d'activité volcanique. Ces unités se sont mises en place selon une progression de l'Est vers l'Ouest et du Sud vers le Nord avec, localement et temporairement, quelques récurrences. Il s'agit chronologiquement (Cf. Illustration 9 et Illustration 10) :

- Du **complexe de base Oligocène** (presqu'îles de la Caravelle et de Sainte Anne), daté à 25 millions d'années (Ma) environ. Il forme une vaste plate-forme mamelonnée, mise en place en contexte sous-marin, composée de hyaloclastites et de quelques coulées massives, situées en position topographique élevée. Cette plate forme est en grande partie immergée et recouverte, sur sa retombée occidentale, par les formations géologiques plus récentes,
- Des **formations calcaires et volcaniques d'âge Miocène inférieur** : plusieurs phases de sédimentation calcaire (calcaires récifaux, calcaires volcanoclastiques), ne subsistant que sous la forme de rares témoins, en position topographique élevée, alternent avec la **série volcanique de Sainte Anne**. Celle-ci est très complète : elle débute par un volcanisme de type sous-marin et se poursuit par une activité aérienne de type strombolien, suivie par la mise en place de dômes de dacite,
- La **chaîne volcanique sous-marine du Vauclin-Pitault** constitue la première grande structure volcanique constitutive de la Martinique actuelle. Ses produits, mis en place entre 17 et 10 Ma, affleurent selon un axe NNO-SSE du Marin au Sud jusqu'aux contreforts méridionaux et orientaux du Morne Jacob au Nord. Il est cependant probable que cet ensemble se poursuive encore plus au Nord, sous les massifs récents du Mont Conil et de la Montagne Pelée. La chaîne du Vauclin-Pitault est composée d'une alternance de phases volcaniques sous-marines et de périodes de sédimentations calcaires.

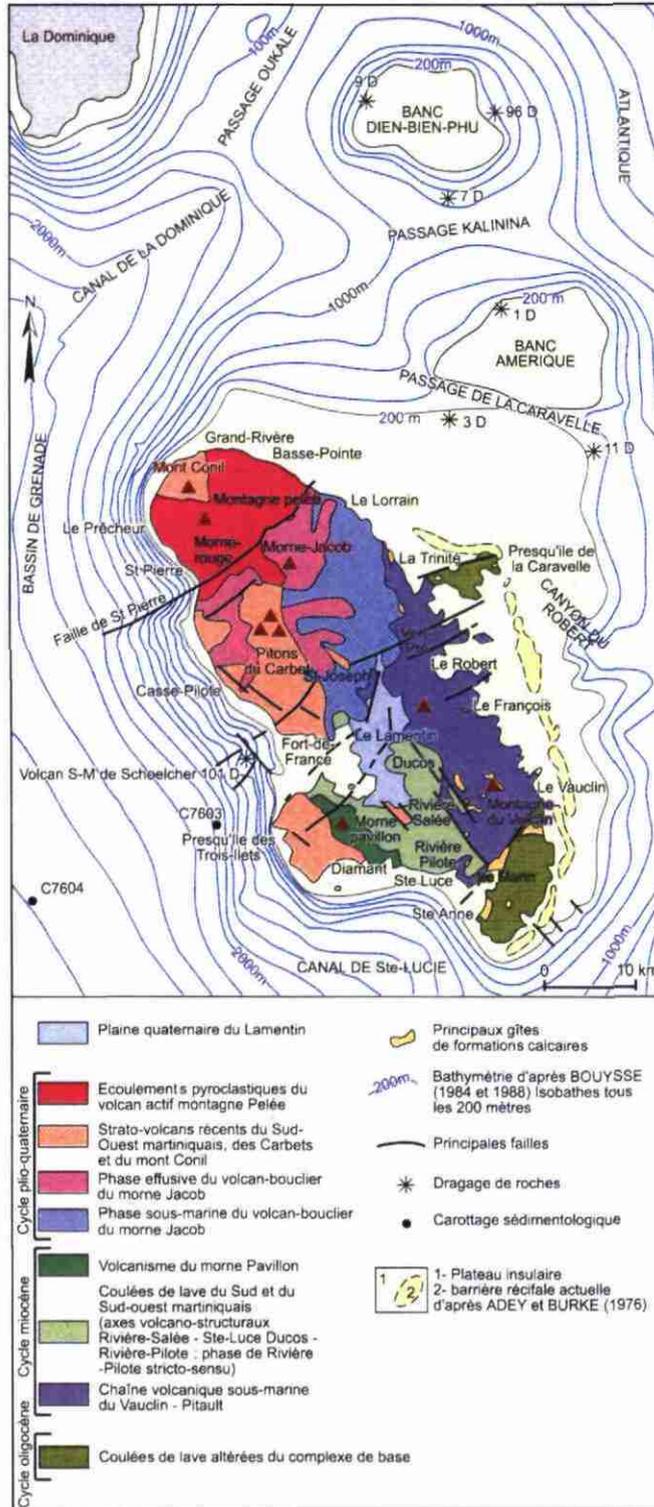


Illustration 9 : esquisse géologique et structurale de la Martinique, d'après Westercamp, 1990

L'épisode initial « François - Robert » concerne les régions limitrophes à ces deux bourgs et les îlets qui leur font face. Il a produit pour l'essentiel des hyaloclastites. Celles-ci sont composées de faciès primaires (de retombée directe) et de faciès remaniés (tuffites ou hyaloclastites remaniées). Des coulées de lave recouvrent un peu partout les hyaloclastites, voire s'y intercalent. Ces formations sont recoupées de nombreux dykes, généralement verticaux, d'épaisseur plurimétrique et orientés selon la direction NW-SE.

Après une première phase de sédimentation calcaire au Miocène moyen, un ensemble de lave massive (les coulées de basalte porphyrique de Vert Pré) s'épanche sur la retombée occidentale des reliefs volcaniques. L'arrêt de la phase basaltique permet une nouvelle fois à la sédimentation calcaire de s'exprimer. Les calcaires du Marin (tuffites calcaires, calcaires récifaux et calcaires francs), atteignant environ 150 m d'épaisseur, constituent ainsi la formation sédimentaire la plus étendue de Martinique (4 km²).

Le plus important complexe volcanique de la chaîne s'édifie ensuite au sein de quatre secteurs géographiques assez bien limités : le massif du Vauclin, le morne Pitault, la région de Trinité et celle du Lamentin - Fort de France. Les formations émises, laves et hyaloclastites, sont du même type que celles mises en place au cours de l'épisode initial « François-Robert ».

Après une troisième phase de sédimentation calcaire, l'activité reprend sur la retombée occidentale de l'extrémité sud de la chaîne volcanique, dans le secteur de Rivière Pilote et Sainte Luce, avec des formations effusives puis des brèches pyroclastiques de type « nuées ardentes », synonymes d'une première émergence locale. Une activité sous-marine au niveau de la montagne du Vauclin constitue l'épisode final d'activité de la chaîne Vauclin - Pitault.

- Entre 9 et 7 Ma environ, les centres d'émission percent à nouveau le flanc caraïbe de la chaîne. L'activité de l'ensemble volcanique fissural du Sud et du Sud-Ouest Martiniquais se manifeste tout d'abord, sous forme de coulées de lave massive, le long d'un axe Ducos - Rivière Pilote puis au niveau de Sainte Luce et du Morne Pavillon où, après une phase phréato-magmatique, elle devient effusive. Ces formations présentent une extension importante, de Sainte Luce à Ducos et de l'Anse à l'Âne à Fort de France (la dépression tectonique de la Baie de Fort de France et de la Plaine du Lamentin, datée à 6,5 Ma environ, est en effet postérieure à ce volcanisme),

- Un ensemble volcano-sédimentaire à forte composante claire, daté à 5,5 Ma environ et marquant le passage Miocène - Pliocène, les formations volcano-sédimentaires de Sainte Marie et de Fort de France, affleure dans ces deux secteurs, respectivement sur les formations volcaniques sous-marines appartenant à la chaîne Vauclin-Pitault à l'Est et sur des coulées massives d'andésite porphyrique attribuées au système fissural du Morne Pavillon à l'Ouest (ceci montre que la dépression tectonique qui forme la baie de Fort de France n'était pas encore constituée). Il est suivi d'une courte période de récession complète du volcanisme qui permet à la sédimentation calcaire de s'installer dans le secteur de Fort-de-France et de se développer à Sainte-

Marie. Elle laissera la place ensuite progressivement à des tuffites azoïques et à des conglomérats polygéniques à éléments volcaniques, puis à des hyaloclastites franches, au fur et à mesure de la reprise du volcanisme, au Pliocène inférieur,

- Après cette relative période de repos d'environ un million d'années, l'activité volcanique reprend sur la retombée septentrionale des reliefs émergés et des haut-fonds de l'oligo-miocène. Le plus vaste édifice volcanique de l'île - le **volcan-bouclier du Morne Jacob** - va s'édifier. En accord avec sa position décalée par rapport aux reliefs préexistants, son activité est d'abord sous-marine. **Il marque néanmoins la transition entre un volcanisme à dominante sous-marine et une activité à majorité aérienne.**

Des hyaloclastites puis des coulées de laves massives, d'abord basiques et porphyriques puis andésitiques et aphyriques, se mettent en place. Des conglomérats soulignent le rôle de l'érosion, dès l'édification des premiers reliefs. L'activité effusive continue avec des coulées massives de basalte et d'andésite à grain fin. A la fin de cette *première phase*, l'activité se restreint au secteur Nord-Est de l'édifice et devient explosive avec mise en place de lahars et de coulées pyroclastiques. Au bout de 1 à 2 Ma (entre 5,5 et 4 Ma), l'édifice du Morne Jacob forme déjà un vaste volcan-bouclier.

Après une période de repos marquée par le dépôt de conglomérats polygéniques grossiers, une *deuxième phase* d'activité reprend côté Caraïbe. Des coulées massives et épaisses, pluridécamétriques voire hectométriques, s'épanchent dans toutes les directions. Elles coiffent les reliefs centraux de l'île autour du Morne Jacob. Ces formations très volumineuses se mettent en place au cours d'une période extrêmement brève, entre 2,8 et 2,2 millions d'années. Après l'extinction de ce volcanisme, le démantèlement du volcan-bouclier se poursuit. Les vallées qui, ultérieurement, seront empruntées par les écoulements pyroclastiques et effusifs en provenance du complexe des Carbets, sont creusées. Des conglomérats polygéniques grossiers se mettent en place en leur sein,

- Le volcanisme montre ensuite une récurrence vers le Sud qui contribue à l'édification de l'extrémité Ouest de la presqu'île des Trois Ilets (**volcanisme Plio-Pléistocène de la presqu'île des Trois Ilets**) entre 2 et 1 Ma, voire 0,6 Ma pour les formations les plus récentes, de faible extension (laves et brèches ponceuses de Rivière Salée). Cet ensemble est pour l'essentiel constitué d'écoulements pyroclastiques, à dominante ponceuse (au Diamant en particulier) ou de type nuée ardente, et de produits effusifs (dômes et coulées de lave massive). Il repose sur un substratum de laves massives altérées, non daté,

- Le **complexe volcanique des Carbets** intrude la retombée occidentale du volcan du Morne Jacob. Les produits grossiers de ces éruptions, **strictement aériens**, se sont mis en place au sein de paléovallées radiales à ces deux édifices, autour de 0,9 Ma. Ils sont surtout développés dans les secteurs de Fort de France et de la côte Caraïbe.

Les premières manifestations sont formées de coulées de ponces dacitiques riches en quartz. Elles se mettent en place après une période de récession du volcanisme (du Morne Jacob) de quelques centaines de milliers d'années seulement. Suivent toute

une serie de brèches pyroclastiques et leurs produits de remaniement (coulées de débris et lahars) en liaison avec les dômes andésitiques centraux. Cette phase d'activité (*édifice peléen du Carbet ancien*) ressemble fortement au dynamisme récent de la montagne Pelée. L'événement suivant marque un changement radical dans la dynamique du volcan : d'épaisses coulées andésitiques envahissent les basses plaines de Fort de France. Des coulées pyroclastiques variées, d'andésite et de dacite, sont ensuite émises et les premiers dômes centraux importants, de même nature, s'édifient (*volcanisme des pitons du Carbet*). L'activité s'achève par la mise en place des spectaculaires pitons centraux du Carbet et de quelques coulées de lave très épaisses. D'épaisses formations conglomératiques résultent de l'érosion du massif, érosion qui agit aussi bien pendant son édification, qu'après,

- Le **volcanisme du Mont Conil** marque le début de l'activité du compartiment géologique septentrional de l'île. Ce massif, entièrement couvert par la forêt tropicale humide, est l'un des endroits les moins pénétrés de Martinique et, de ce fait, demeure le moins bien connu sur le plan géologique.

L'*édifice initial du Morne Citron*, édifié entre 1 et 0,7 million d'années, est constitué pour l'essentiel de coulées de lave massive, d'intrusions de lave massive largement autobréchiques en périphérie et de brèches d'explosion hydromagmatique. Ces formations sont localement remaniées en épais conglomérats lités. C'est vraisemblablement du *Piton Mont Conil* que sont ensuite émises des coulées de lave massive, localement bréchifiées, datées à 0,5 Ma. L'*activité finale* de cet ensemble voit l'émission de produits riches en andésite à hornblende qui affleurent à la base de la Montagne Pelée : lave massive, brèches pyroclastiques et agglomérats. L'âge de $0,40 \pm 0,20$ Ma borne le début d'activité de la Montagne Pelée,

- La **Montagne Pelée** est le seul volcan actuellement actif de la Martinique. Son édification s'est effectuée en trois principales phases :

- L'*édifice ancien de la Montagne Pelée* est composé de coulées pyroclastiques recouvertes, dans la partie centrale du volcan, de coulées de lave massives d'épaisseur pluridécamétrique. Ces dernières sont peu nombreuses et confinées dans la moitié supérieure du cône.

- Au coeur de la caldeira d'effondrement en fer à cheval de l'édifice ancien, dont la formation s'est accompagnée de la mise en place de lahars et de coulées de débris, s'édifie un nouveau volcan, l'*édifice intermédiaire*. Ses produits consistent essentiellement en nuées ardentes. Son activité finale s'achève, il y a environ 20.000 ans, après plusieurs éruptions très importantes du type « Saint-Vincent ». Entre temps, un lac s'est créé au Sud-Est du Morne-Rouge (Champflore) au sein duquel se sont déposés argiles varvées, grès et tourbes. Sa création est probablement une conséquence de la mise en place des nuées ardentes dont les dépôts ont barré localement le cours moyen de la rivière Capot.

- Le nouveau cycle éruptif du volcan (*édifice récent*) suit une phase d'arrêt complet du volcanisme longue de 6000 ans environ. Les produits pyroclastiques émis construisent le cône actuel. Cette dernière phase d'activité est caractérisée par une

alternance d'éruptions ponceuses (explosions pliniennes et coulées de ponces) et de nuées ardentes (dômes et écoulements pyroclastiques mettant en jeu une lave essentiellement massive). Ces formations se mettent en place successivement au sein d'un réseau complexe de vallées emboîtées tout autour de l'édifice. Les produits liés à l'activité actuelle (éruptions de 1902 - 1929) se sont essentiellement déposés sur le flanc ouest du volcan,

Une couverture continue d'**alluvions récentes** occupe le fond des basses vallées de l'ensemble des rivières de l'île ; seules les plus importantes d'entre elles possèdent des terrasses alluviales, souvent discontinues, dans leur partie moyenne. Les alluvions consistent d'une manière générale en conglomérats plus ou moins grossiers, silts et argiles. Elles sont relayées et/ou interstratifiées avec des formations de type **mangrove** (tourbes, sables, vases, etc.), présentant localement une extension importante (baie de Fort de France), et qui marquent le colmatage actuel des rias creusées lors des bas niveaux marins. Les **sables de plage** présentent une extension très réduite limitée à l'extrême bordure côtière de quelques anses. Par ailleurs, les **retombées de cendres** liées à l'activité des édifices intermédiaire et récent de la montagne Pelée nappent toute la partie nord de la Martinique. Leur épaisseur croît du Sud vers le Nord, de 1 m environ sur les hauteurs de Fort de France et du Robert jusqu'à plus de 5 m au niveau de Fonds Saint Denis et du Morne Rouge.

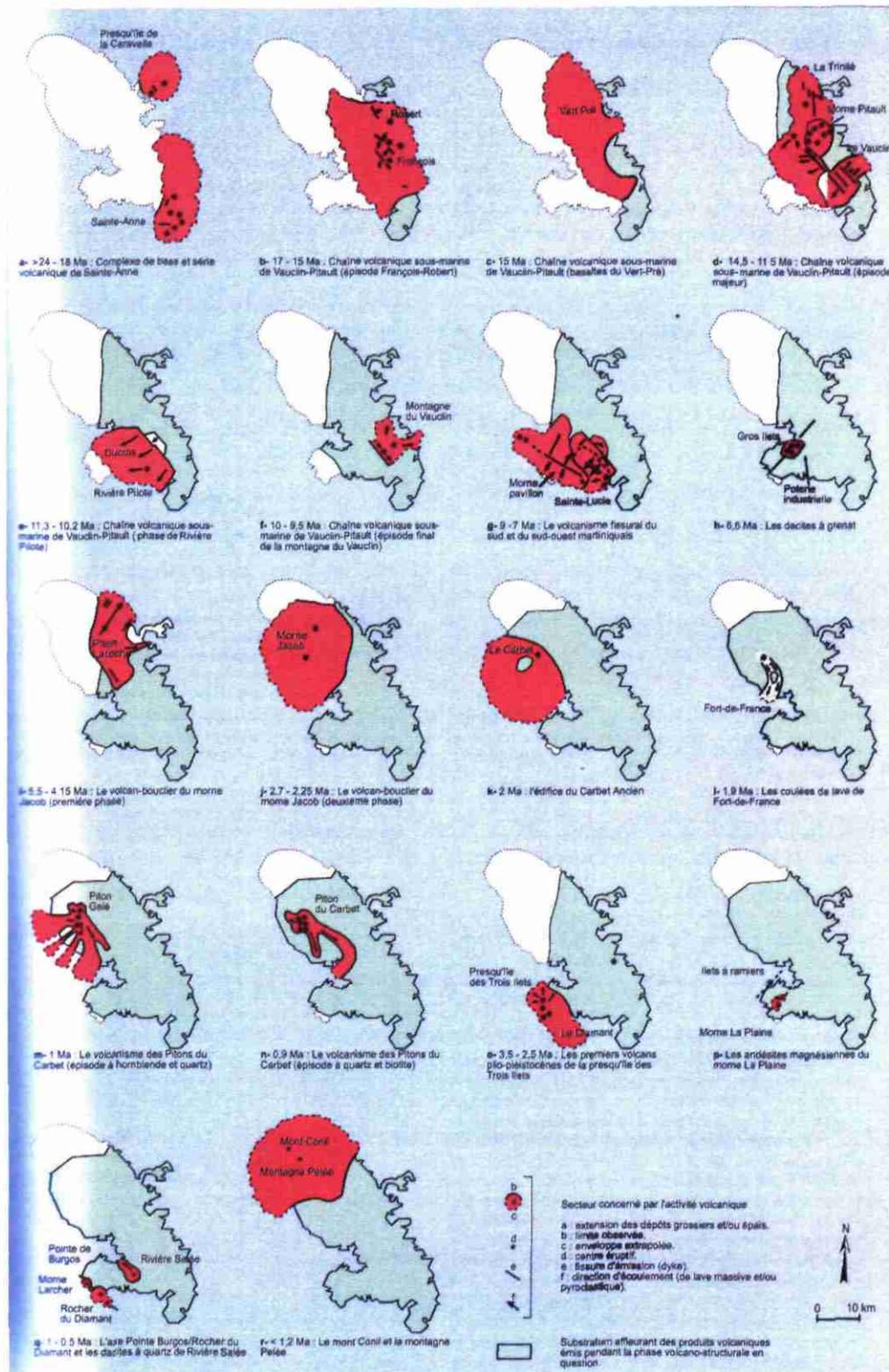


Illustration 10 : histoire géologique de la Martinique (Andreieff et Al, 1988)

3.2. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES DES PRINCIPALES FORMATIONS GEOLOGIQUES - PRINCIPAUX AQUIFERES RECONNUS

Compte tenu de la nature essentiellement volcanique des terrains qui composent son sous-sol, la Martinique ne presente pas de grands aquiferes continus, aux limites facilement identifiabiles. En effet, bien que le facteur « lithologie » soit determinant quant aux proprietes hydrauliques d'une formation geologique (cf. paragraphes suivants), la tres forte heterogeneite des series volcaniques, particulierement celles mises en place en contexte aerien, ainsi que le role important joue par la fracturation contribuent a une tres forte variabilite spatiale des proprietes hydrogeologiques. Le relief accuse ainsi que les effets de l'alteration accentuent cette variabilite.

La description des aquiferes ci-dessous s'appuiera donc sur une approche lithologique, basee sur l'experience acquise en Martinique, et illustree de resultats obtenus lors de prospections hydrogeologiques.

Les formations volcaniques et volcanosedimentaires presentent, du fait de leurs conditions de mise en place (en milieu aerien ou sous une faible tranche d'eau) ou des processus d'erosion qui suivent leur depot, une tres forte variabilite laterale et verticale. Par ailleurs, ces roches sont soumises a des processus d'alteration qui transforment leurs caracteristiques hydrogeologiques primaires et accentuent ces heterogeneites : alteration d'origine climatique, tres developpee sous climat de type tropical humide, alteration hydrothermale, frequente en contexte de volcanisme actif.

L'essentiel de la permeabilite de ces formations est assure par la fracturation, meme si, dans certains cas, les permeabilites d'interstices ou de fissures peuvent etre preponderantes. Dans un tel contexte, seule la reactivation reguliere de cette fracturation, par le jeu d'une tectonique active, est susceptible d'assurer la perennite de la permeabilite des fractures, donc celle des circulations d'eau souterraine en leur sein.

Par ailleurs, dans le contexte de la Martinique, mis a part, dans une certaine mesure, sur l'edifice de la Montagne Pelée, les structures de type « paléovallées » ne constituent a priori pas, comme dans d'autres régions volcaniques (chaîne des Puys par exemple), l'un des éléments clés de la dynamique des écoulements souterrains.

3.2.1. Les laves

Proprietés hydrogeologiques

Les proprietés aquiferes des laves dependent etroitement d'une part de leur degre d'alteration et d'autre part de leurs conditions de fissuration et de fracturation.

L'alteration climatique ou hydrothermale de la roche se traduit par une argilisation partielle ou totale de ses mineraux constitutifs qui oblitere, en partie ou completement, une eventuelle permeabilite. L'alterabilite des differents faciés constitutifs d'une coulee

est variable. Dans un schéma type de coulée à la lave relativement fluide, les faciès de bordure (brèches et scories des murs, toit et flancs de coulée) présentent, du fait de leurs porosités et perméabilités initiales, une plus forte aptitude à s'altérer rapidement que le cœur de l'écoulement, massif car refroidi lentement. Ainsi, un même ensemble lithologique peut constituer à la fois des niveaux aquifères (dans ses parties non altérées) et un substratum ou toit imperméable aux formations sus ou sous-jacentes (pour ce qui concerne ses parties argilisées). En outre, les laves montrent souvent, du fait de la composition du magma, une forte viscosité. Celle-ci entraîne une bréchification de la roche lors de sa mise en place. Leur dépôt en contexte sous-marin génère également des faciès bréchiques. Dans ces conditions, la progression des fronts d'altération peut être beaucoup plus homogène et régulière.

Les figures d'écoulement ou de refroidissement de la lave (à la base, débit en plaquettes ou figures de flux parallèles au substratum ; dans la masse, prismation) génèrent une fissuration primaire qui peut lui conférer des caractéristiques hydrauliques intéressantes surtout si cette perméabilité initiale est renforcée par une fracturation d'origine tectonique. Cette dernière s'exprime bien au sein de ces matériaux compétents.

Principaux secteurs aquifères

Ce sont donc parmi les ensembles géologiques à forte dominante de laves que les aquifères les plus productifs de Martinique ont été identifiés.

- **L'aquifère de la plaine du Lamentin** a été reconnu entre la ville du **Lamentin**, l'aéroport, le pied des reliefs séparant le **Lamentin** du **François** et le long de la rivière Petite Lézarde. Bien que non exploité, il constitue, dans l'état actuel des connaissances, l'une des plus importantes ressources potentielles en eau souterraine de la Région. Les formations volcaniques, rattachées à la **chaîne du Vauclin - Pitault**, ont été reconnues par 9 forages, implantés dans les années 80 sur la base de prospections géophysiques. Il s'agit de basaltes fracturés (« basalte porphyrique de Vert-Pré »), au sein desquels la nappe est maintenue captive par environ 30 m de formations peu perméables (alluvions argileuses et frange altérée du substratum), qui jouent probablement un rôle « capacitif ». Plusieurs ouvrages présentent une forte transmissivité (voisine de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour des épaisseurs captées comprises entre 15 et 30 m) et l'un d'entre eux a pu être testé sur quelques jours à un débit de $120 \text{ m}^3/\text{h}$, son débit d'exploitation à long terme se trouvant a priori plutôt vers $80 \text{ m}^3/\text{h}$ (estimation faite à la suite d'un essai de pompage d'un an). Les coefficients d'emmagasinement, caractéristiques d'une nappe semi-captive en milieu fracturé, sont compris entre $7 \cdot 10^{-3}$ et $2 \cdot 10^{-5}$. Les forages les moins productifs présentent un débit de l'ordre de $5 \text{ m}^3/\text{h}$. La piézométrie de l'aquifère, relativement élevée (7 m NGM à moins de 4 km du littoral) est synonyme d'une bonne alimentation par l'amont ainsi que d'un possible effet d'écran joué par le recouvrement sédimentaire et/ou par l'altération hydrothermale des laves dans la partie aval de l'aquifère ; ces éléments ne font pas craindre de risque important d'intrusion saline.

- Les mêmes laves présentent des caractéristiques hydrogéologiques intéressantes y compris lorsqu'elles se situent en position perchée. Le forage de Vert Pré (40 m de profondeur), implanté au sein des basaltes éponymes, présente ainsi un débit de l'ordre de 18 m³/h alors qu'il se situe sur le flanc d'un morne, à plus de 150 m d'altitude, le cours d'eau le plus proche (moins d'un kilomètre) coulant à seulement 60 m NGM. Par analogie, les laves de la région de **Ducos / Rivière Salée** pourraient présenter des propriétés similaires à celles du **Lamentin** : les forages de reconnaissance en cours (2006), réalisés par la Région et la DAF, ont montré la présence d'eau souterraine en profondeur. Cet ouvrage a pu être testé à un débit d'environ 15 m³/h (s'agissant d'un forage de petit diamètre, il n'a pas pu être testé à un débit supérieur).
- Les laves émises par le **volcan bouclier du Morne Jacob** sont bien connues sur le versant **nord caraïbe** de l'île où elles présentent un débit caractéristique, en plaquettes d'épaisseur centimétrique, qui, seul ou couplé à une fracturation d'origine tectonique, leur confère de bonnes propriétés aquifères.

Les principales zones où les andésites se trouvent dans une position topographique favorable (fond de vallée) ont été reconnues. Ces laves sont ainsi captées par forage à **Schœlcher**, seules (Fond Lahaye) ou de manière conjointe avec d'autres formations, ponces remaniées et alluvions à **Case Navire**. Elles le sont aussi au **Carbet**, là encore avec des alluvions récentes. Sur ces trois sites, les transmissivités mesurées lors des pompages d'essai oscillent, selon les forages, entre 5.10⁻⁴ et 1.10⁻³ m²/s et autorisent des débits d'exploitation de l'ordre de 40 à 50 m³/h par ouvrage. Ici encore, les résultats obtenus montrent l'importance de la fracturation ; l'un des forages de la vallée de **Case Navire** a ainsi été implanté avec succès sur la base de la première campagne de prospection radon mise en œuvre en Martinique.

Les laves du Morne Jacob sont aussi à l'origine, du fait de leurs bonnes propriétés hydrogéologiques, de l'émergence de nombreuses sources situées, il est vrai, dans des secteurs parmi les plus arrosés de Martinique (**Fonds Saint Denis, Morne Vert**).

Le substratum des formations lacustres de remplissage du bassin de Champflore, constitué lui aussi par les andésites du Morne Jacob, non reconnu encore par géophysique ou forage, pourrait constituer une cible d'intérêt pour l'AEP des communes du nord de la Martinique et en particulier du **Morne Rouge**. Il en est de même des laves qui affleurent dans la plupart des vallées du Nord - Atlantique du département.

- Des sources au débit important (débit d'étiage moyen pouvant atteindre 50 m³/h) émergent des **dacites** issues du **volcanisme des pitons du Carbet**, en particulier en périphérie du bassin de **Champflore**. La source exploitée par l'usine d'embouteillage « Chanflor », la source dite du « piton Gelé » qui alimente certains quartiers du Morne Rouge, d'autres sources utilisées par des exploitations agricoles sont ainsi issues de ces formations. Quelques émergences se situent également sur le flanc ouest du massif (source Yang-Ting à **Fond Saint Denis**, captée pour l'AEP - plus de 20 m³/h en étiage, source Attila, etc.). Leur localisation semble liée principalement aux facteurs de

fracturation et fissuration. Les structures de type « paléovallée » ne semblent avoir qu'une influence mineure sur leur localisation.

Les laves ont également été reconnues dans le Sud de la Martinique. Des résultats positifs ont ainsi été obtenus à **Rivière Pilote** (La Mauny, Grande Rivière Pilote).

3.2.2. Les pyroclastites

Propriétés hydrogéologiques

Les **nuées ardentes** (de type Péléen, Mérapi ou Saint Vincent) sont à l'origine de dépôts constitués d'éléments lithiques juvéniles, donc généralement sains, grossiers et meubles. Elles comportent généralement une matrice cendreuse abondante (éléments de taille inférieure à 2 mm), des blocs anguleux (de taille décimétrique à plurimétrique) et des lapillis (éléments de taille comprise entre 2 et 64 mm), peu ou non vésiculés. Ce type de dépôt est donc caractérisé par une très forte hétérométrie. Il est généralement non ou mal classé.

Les matériaux constitutifs des nuées ardentes présentent donc une perméabilité d'interstices digne d'intérêt pour la prospection hydrogéologique qui n'est pas remise en cause par leur très forte hétérométrie. Constituées essentiellement de produits juvéniles, ces formations s'altèrent en outre relativement lentement. Les zones axiales des écoulements sont plus pauvres en matrice cendreuse et présentent de ce fait généralement une plus forte perméabilité.

Les éruptions magmatiques qui président à la mise en place des nuées ardentes sont en règle générale précédées d'éruptions phréatiques qui remobilisent et pulvérisent des matériaux anciens. Les retombées associées génèrent des niveaux cendro-sableux d'épaisseur souvent faible (inframétrique) qui s'imperméabilisent à relativement court terme et constituent un substratum imperméable aux dépôts de nuées ardentes.

Les formations de type "nuées ardentes" forment donc grossièrement une succession de niveaux perméables (pouvant receler des imperméables relatifs interstratifiés) et imperméables, les derniers présentant en général une épaisseur plus restreinte. Par ailleurs, la conjonction axe de paléovallée, donc épaisseur plus importante de matériau, faible proportion d'éléments fins, donc perméabilité initiale plus forte et moindre faculté à s'altérer, constitue un facteur intéressant pour le développement d'aquifères de bonne qualité. **Les nuées ardentes constituent donc globalement des formations présentant de bonnes propriétés hydrogéologiques.**

Les **coulées de ponces** sont en règle générale constituées de lapilli ponceux et de blocs emballés dans une matrice cendreuse. Des niveaux cendres séparent souvent les différentes unités d'écoulement qui sont la plupart du temps canalisées par le réseau hydrographique. Ces coulées peuvent être associées à des **dépôts pliniens** (retombées aériennes issues d'un panache ascendant à partir d'un cratère ouvert) qui

se présentent sous la forme de lits stratifiés, à granoclassement normal, constitués de cendres, lapilli et petits blocs vésiculés. Ces dépôts, d'épaisseur d'autant plus réduite que l'on s'éloigne du point de sortie et de granulométrie fine, s'altèrent rapidement. Ils sont rarement préservés dans l'axe des vallées dans la mesure où ils sont entraînés par l'érosion. Les coulées de ponces présentent donc de plus faibles potentialités hydrogéologiques que les dépôts de nuées ardentes, en particulier dans les secteurs où le climat humide conduit à leur rapide altération.

Principaux secteurs aquifères

Les aquifères constitués de pyroclastites sont très développés au sein des formations émises par la Montagne Pelée.

Sur son flanc sud-ouest, les formations pyroclastiques, peu altérées, constituent des aquifères très productifs. La source Morestin (plus de 200 m³/h en étiage), et le forage « Pécoul » (exploitable à environ 70 m³/h), tous deux situés au Nord-Est de **Saint Pierre**, constituent les deux principales sources d'approvisionnement du Syndicat de la Côte Caraïbe Nord-Ouest. Un ouvrage foré à **Fond Canonville**, entre Saint Pierre et le Prêcheur, pourrait également être exploité à plus de 50 m³/h. Cet aquifère présente un fort hydrodynamisme et de bonnes propriétés de perméabilité, comme l'attestent des venues d'eau douce en mer, au nord-ouest de Saint Pierre, ainsi que le caractère non pérenne des cours d'eau du flanc ouest de la Montagne Pelée.

Sur son flanc est (**Ajoupa Bouillon, Basse Pointe**), la répétition de la mise en place, au sein de paléovallées, de séquences de nuées ardentes, relativement peu altérées, et de ponces, très argilisées et jouant de ce fait un rôle d'imperméable relatif, a constitué un ensemble aquifère très hétérogène, tant latéralement que verticalement. Recoupé par une topographie accusée, il est à l'origine de très nombreuses sources, aux débits moyens à faibles (quelques m³/h à une dizaine de m³/h). Les plus importantes d'entre elles sont captées pour l'AEP (sources Fond Dessources et Marc Cécile à l'**Ajoupa Bouillon**, Socco, Hauteurs Bourdon et Adrienne à **Basse Pointe**, Cadette et Maître Jean à **Macouba**). Cet ensemble aquifère contribue aussi, pour l'essentiel, au débit de la rivière Falaise (près de 300 m³/h par kilomètre de linéaire, en étiage, entre les prises d'eau situées aux cotes 250 et 75 m NGM).

Cet « interstratifié » est capté par forage à **Ajoupa Bouillon et à Basse Pointe**. Les ouvrages ont été implantés sur la base de données géologiques et géophysiques, au droit des axes supposés de paléovallées. Les nuées ardentes y présentent une transmissivité de l'ordre de 10⁻³ m²/s (pour une épaisseur d'aquifère capté de l'ordre de 15 m) et un coefficient d'emménagement voisin de 0,3%, qui autorisent des débits d'exploitation de l'ordre de 15 à 20 m³/h.

Les ponces et brèches de la plaine du Diamant, peu altérées, présentent en général de relativement bonnes propriétés hydrodynamiques (transmissivité de l'ordre de 2.10⁻³ m²/s, coefficient d'emménagement voisin de 7%). Les observations réalisées lors des sondages suggèrent cependant des caractéristiques relativement hétérogènes

(secteurs plus perméables correspondant soit à des variations granulométriques, soit à de la fracturation). Dans ce secteur littoral, leur exploitation est par contre subordonnée à une connaissance précise des conditions de recharge et de la dynamique de l'interface eau douce - eau salée.

3.2.3. Les hyaloclastites

Propriétés hydrogéologiques

Ce sont des roches volcanosédimentaires soit formées par l'accumulation directe de produits volcaniques fins émis en milieu sous-aquatique (hyaloclastites primaires), soit liées à la reprise de ceux-ci par les courants marins (hyaloclastites secondaires ou tuffites). Les hyaloclastites présentent donc des faciès variés :

- les faciès de retombée directe sont non classés et essentiellement constitués de lapillis massifs et scoriacés, emballés dans une matrice cendreuse grossière, indurée, de même nature,
- les tuffites sont constituées d'alternances de bancs de microconglomérats, de grès fins et de silts pris dans un ciment calcaire ou argileux,
- des faciès nettement plus grossiers, de caractère conglomératique voire de type « lahar », sont également représentés.

Des coulées de lave interstratifiées sont souvent associées aux hyaloclastites.

Ces formations présentent intrinsèquement une faible perméabilité. Constituées d'éléments de lave de faible granulométrie, en général jointifs, elles sont dotées initialement d'une porosité d'interstices limitée, que diminuent encore les phénomènes d'altération (climatique ou hydrothermale) particulièrement actifs et efficaces sur les éléments de petite taille constitutifs de la roche.

La présence, en particulier au sein des faciès primaires, de coulées de lave interstratifiées ainsi que la fracturation d'origine tectonique peuvent néanmoins leur conférer localement de relativement bonnes propriétés aquifères.

Principaux secteurs aquifères

Les hyaloclastites de la chaîne Vauclin - Pitault ont été reconnues par forage dans une partie de la dépression de Grand Fond, sur la commune du **Marin**. Elles y présentent, malgré l'absence apparente de laves interstratifiées, de bonnes propriétés hydrodynamiques (transmissivité voisine de $8.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour 30 m de hauteur mouillée, coefficient d'emménagement de 0,2% environ ; un des forages pouvant être exploité à plus de $30 \text{ m}^3/\text{h}$).

Les variabilites des resultats obtenus dans les annees 60 et 70 au **François** ainsi que dans les vallées de la Rivière Blanche et de la rivière Lézarde (taux de succès pour des transmissivités supérieures ou égales à 10^{-3} m²/s voisin de 20%) est représentative des résultats des prospections d'eau menées en milieu fracturé, lorsque la méthodologie mise en œuvre ne permet pas la localisation précise de la fracturation. Les progrès récents des techniques de prospection permettent donc de réévaluer très significativement le potentiel de ce type de formation, et d'espérer de meilleurs taux de succès.

Des mesures effectuées sur la tuffite de Fort de France montrent que ces formations présentent une perméabilité de l'ordre de 5.10^{-6} à 1.10^{-5} m/s, lorsqu'elles sont saines mais non fracturées.

3.2.4. Les conglomérats et lahars

Les formations détritiques de type **conglomérat** sont en général caractérisées par un fort degré d'altération, les éléments du conglomérat eux-mêmes étant souvent déjà altérés lors de leur mise en place (figures de desquamation en pelures d'oignon). Ils présentent donc de faibles potentialités. Ainsi, dans la région Nord-Atlantique, les conglomérats jouent souvent un rôle de substratum imperméable vis à vis des laves aquifères sus-jacentes.

Les **lahars** sont des brèches non classées, hétérogènes, à forte composante terrigène. La matrice argilo-sableuse abondante qui les caractérise leur confère une faible perméabilité. Les lahars reconnus par forage dans la vallée de Fond Nigaud à Schoelcher se sont révélés secs.

Seule la conjonction d'une faible argilisation et d'une fracturation importante serait susceptible de conférer localement des propriétés aquifères à ces formations.

3.2.5. Les calcaires (origine sédimentaire)

Les calcaires du Sud de la Martinique sont rarement francs (purs). Ils présentent très généralement une composante détritique d'origine volcanique.

Les formations calcaires, d'extension très réduite, se situent en général en position topographique haute. En outre, même si des phénomènes de karstification superficielle de type « épikarst » peuvent se surimposer à la porosité d'interstices, de fissures ou de fractures, aucun karst fonctionnel ou noyé n'est connu en Martinique.

Ainsi, les forages réalisés dans la plaine des Grands Fonds du Marin ont montré que les calcaires non karstifiés présentaient de très médiocres propriétés hydrodynamiques (transmissivité inférieure à 10^{-5} m²/s pour 50 m de hauteur mouillée), l'essentiel de la productivité des forages positifs étant assuré par leur substratum volcanique (cf. § 3.1.3.). A Caritan par contre, sur la commune de Sainte Anne, les calcaires montrent de bonnes caractéristiques (transmissivité comprise entre 10^{-2} et 10^{-3} m²/s). Il n'est cependant guère envisageable de les mettre significativement en valeur en raison de la

proximité de l'interface eau douce / eau salée et du caractère très peu redressé de celle-ci (conjonction de la faiblesse de la recharge et de l'extension limitée du bassin versant d'alimentation des calcaires).

3.2.6. Les formations superficielles récentes

Les formations de type mangrove sont intrinsèquement peu perméables (dominante argileuse).

Les sables de plage présentent toujours, à l'exception de la formation anciennement exploitée en carrière à Grand Macabou, une faible extension. Ils sont de plus soumis aux effets de la proximité du littoral (eaux salées ou saumâtres).

Les alluvions fluviales ne montrent des propriétés intéressantes (épaisseur et extension suffisantes, faible teneur en argile) que dans les vallées de la côte ouest de la Martinique (de Schoelcher à Grand Rivière). En outre, leur exploitation à des débits importants n'est envisageable qu'en complément de celle d'un aquifère volcanique sous-jacent, comme à Schoelcher, au Carbet ou à Grand'Rivière.

3.3. AMELIORATION DE LA CONNAISSANCE

Les connaissances des aquifères volcaniques restent encore très partielles, en ce qui concerne la compréhension de leur structure mais aussi et surtout leur fonctionnement hydrogéologique.

Le développement de l'exploitation et la réalisation d'essai de pompage de longue durée (3, 6 mois voire un an comme cela a été le cas au Lamentin), accompagné d'un suivi en continu des niveaux piézométriques de la nappe (dans le forage et dans plusieurs piézomètres), d'un suivi en continu des débits exhaurés et d'un suivi régulier de la qualité des eaux du forage et de celles des piézomètres, permettra, à l'avenir, d'améliorer les connaissances de façon significative et surtout de façon pragmatique.

Les méthodologies de prospection hydrogéologique en milieux volcaniques sont fortement compliquées par l'extrême hétérogénéité du milieu à toutes les échelles et la complexité des structures. Les méthodes classiques doivent être intégrées dans une approche tridimensionnelle permettant de décrire le système dans toute sa complexité. En tout état de cause, l'exploitation de la ressource en eau des aquifères volcaniques se fait sur la base de modèles conceptuels établis à partir de la synthèse des différentes couches d'informations issues des différentes approches :

- ◆ lithologie et structure de l'aquifère,
- ◆ fonctionnement hydrogéologique et paramètres hydrodynamiques,
- ◆ suivi quantitatif et qualitatif,
- ◆ bilans hydrologiques (notamment sur la base de la connaissance de la pluviométrie et des débits écoulés en rivière),
- ◆ modélisation (si les données sont suffisantes).



4. Methodologie d'elaboration du systeme d'information geographique et presentation des differentes couches d'informations

4.1. INTRODUCTION

En se basant sur les connaissances concernant la geologie et l'hydrogeologie regionales (cf. notamment chapitre precedent) et sur l'ensemble des documents disponibles, l'extension spatiale des formations geologiques susceptibles d'etre aquiferes (ainsi que chacune des formations susceptibles de ne pas l'etre et de jouer ainsi un role de semi-permeable ou d'impermeable) a ete representee, sous la forme d'une cartographie georeferencee.

L'objectif etait de pouvoir connaitre, en tout point de la Martinique (c'est a dire pour tout forage potentiel que l'on souhaiterait realiser), quelles sont les formations geologiques que l'on sera amene a rencontrer en subsurface (au sein des 100 a 150 premiers metres environ) et quelles seront leurs caracteristiques hydrogeologiques (structure, parametres hydrodynamiques, etc.).

D'autres informations, a caractere moins local, sont aussi presentees. Elles concernent les forages existant et les sources actuellement recensees, les limites des aquiferes, ainsi que des elements sur leur fonctionnement (cartes piezometriques, lorsqu'elles sont disponibles, exutoires, etc.).

Ce SIG sera donc en outre un outil d'aide a la decision pour l'orientation des prospections d'eau souterraine.

4.2. INFORMATIONS APORTEES PAR LES FORAGES

Tous les forages realises en France et dont la profondeur depasse 10 m doivent etre declares a la DRIRE et au BRGM au titre du code minier (article 131). Les informations ainsi recueillies (coupes geologiques, donnees hydrogeologiques, etc.) sont archivees et conservees dans la **Banque du Sous-Sol (BSS)** geree par le BRGM et accessible au public (article 132).

Parmi les forages declares en Martinique et disponibles en BSS, tous les forages ayant recoupe une formation consideree comme aquifere (et ayant un niveau d'eau renseigne) ont ete extraits. Les donnees geologiques disponibles sur ces ouvrages ont ete reinterpretees a la lumiere de leurs description et de la carte geologique a 1/50.000 afin de definir la nature de la ou des formation(s) aquifere(s) recoupee(s) par le forage, de preciser, le cas echant, l'extension spatiale de cette (ces) formation(s), et de caracteriser les aquiferes, tant sur le plan geologique que de leurs caracteristiques hydrogeologiques, lorsque ces informations sont disponibles.

Notons que la plupart de ces forages sont anciens, ont été réalisés dans le cadre d'études ponctuelles et, souvent, n'existent plus sur le terrain. En effet, à ce jour, seule une cinquantaine de ces forages existe encore, dont 4 (Pecoul, Demarre, Morne Balai, Grande Savane) sont actuellement utilisés pour l'AEP et 33 intégrés au sein du réseau régional de suivi piézométrique. Pour plus d'informations sur le réseau piézométrique, on pourra se reporter aux derniers rapports BRGM : RP-55255-FR et RP-55330-FR, ainsi qu'au site internet <http://www.adès.eaufrance.fr/>.

174 forages ont ainsi été recensés et réinterprétés (Illustration 11). Toutes les informations disponibles pour ces forages sont intégrées au sein d'une couche du système d'information géographique développé dans le cadre du présent projet.

4.2.1. Structure de la base de donnée associée

La base de données associée à ces forages est la suivante :

- Numéro national du forage au sein de la BSS
- Numéro BSS/Géologie : cette information permet de visualiser directement quelle(s) formation(s) géologique(s) est/sont recoupée(s) par le forage sélectionné
- Commune
- Lieu-dit
- X, Y (système de projection Fort Desaix UTM 20) et Zsol en m, indiqué en BSS.
- Profondeur du forage, en m
- Profondeur du niveau piézométrique dans le forage mesurée par rapport au sol (cette information est à prendre avec recul, car elle repose sur la valeur déclarée, l'incertitude de mesure n'est généralement pas connue et elle peut parfois être supérieure au mètre)
- Forage existant encore (oui ou non)
- Usage du forage (si existant) : Alimentation en Eau Potable (AEP), piézomètre, forage de reconnaissance.
- Lien internet vers la base de donnée nationale ADES lorsque ce forage a fait l'objet d'un suivi piézométrique
- Rapport BRGM : référence bibliographique du rapport BRGM dans lequel cet ouvrage a été cité (il s'agit en général du rapport établi à l'issue de la campagne de forages et non de la liste exhaustive des rapports qui mentionnent ou utilisent les données relatives à ce forage)
- Débit testé, en m³/h, lorsque l'ouvrage a fait l'objet d'un essai de pompage
- Transmissivité en m²/s, lorsque celle-ci a été calculée à la suite d'un essai de pompage
- Formation géologique recoupée(s) par le forage
- Faciès géologique de la formation selon dictionnaire normalisé
- Profondeurs du toit et du mur de la formation recoupée par le forage
- Profondeur de la base des roches altérées (altération) et type d'altération, lorsque cette donnée est disponible

- Type de porosité de la formation géologique recoupée par le forage (interstices, fissures, fractures, etc.)
- Commentaire sur le forage : détail géologique particulier, incertitude sur tel ou tel point...
- Lien vers la coupe géologique disponible sur la base de données INFOTERRE (www.brgm.fr).

Un forage étant susceptible de recouper plusieurs formations géologiques, chaque forage présent au sein du SIG pourra être représenté par plusieurs points (qui seront alors superposés).

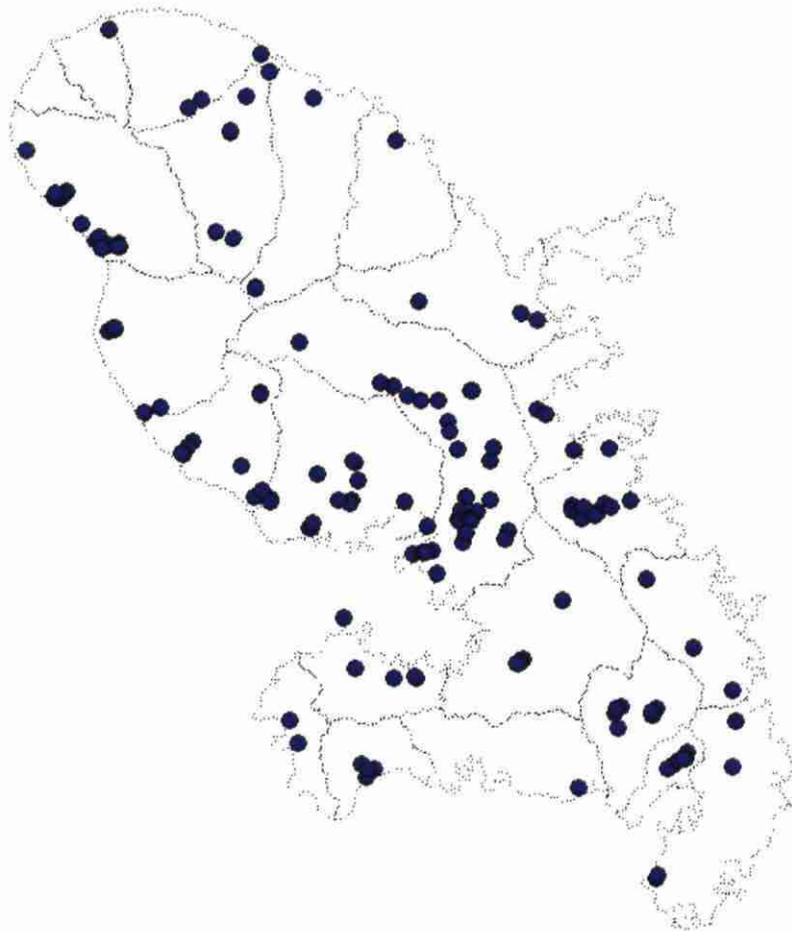


Illustration 11 : localisation des 174 forages réinterprétés dans le cadre du projet (en bleu)

Synthese des donnees hydrogeologiques disponibles

a) Les debits des essais de pompage

L'illustration 12 presente l'histogramme des debits classes des 96 forages de la base de donnees pour lesquels cette information est disponible.

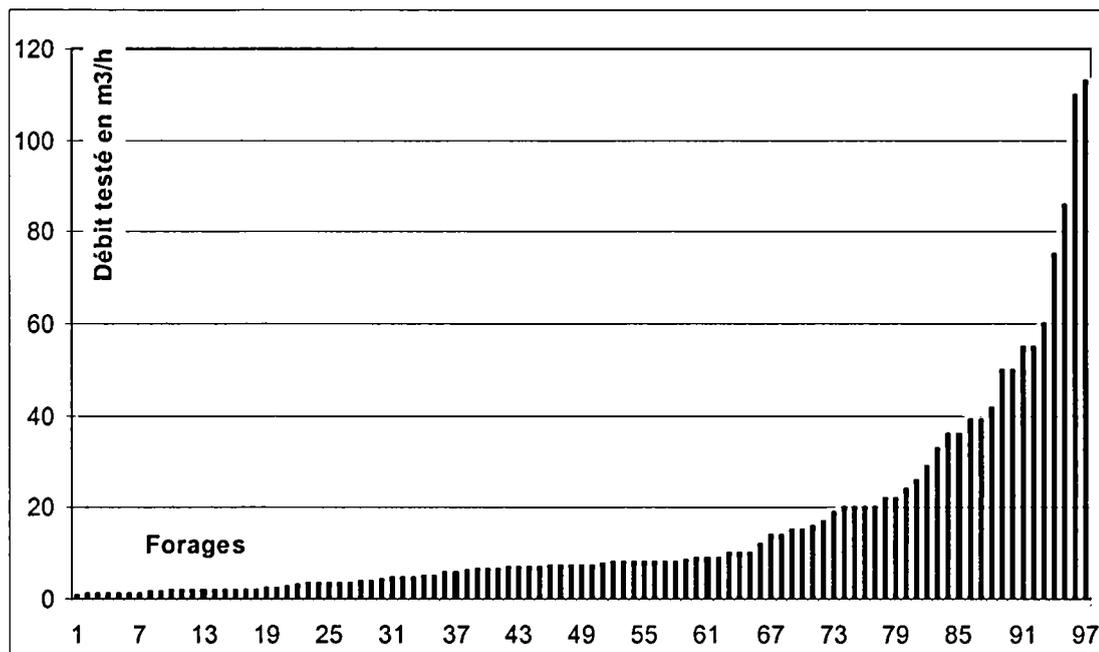


Illustration 12 : Histogramme des debits classes des 96 forages de Martinique pour lesquels cette information est disponible

67 % des essais de pompage n'ont permis de tester que des debits inferieurs a 10 m³/h (Illustration 13). 4 forages ont ete testes a un debit superieur ou egal a 60 m³/h, et 17% des forages ont ete testes a un debit superieur a 20 m³/h.

Cette faible proportion de forts debits est representative, pour partie, de la productivite des formations geologiques presentes en Martinique. Elle est aussi la consequence des limites techniques de l'epoque a laquelle les forages et pompages ont realises. En effet, d'une part la productivite d'un forage depend de ses conditions d'implantation et, d'autre part le debit de l'essai pompage est directement lie au debit de la pompe, lui-meme contraint par le diametre du forage. Plus celui-ci sera reduit, plus le debit auquel il pourra etre teste sera faible. Ainsi, des annees 1960 a 1985, la plupart des essais de pompage etaient realises avec une pompe ne pouvant debiter plus de 8 m³/h.

96	forages testés	
64	forages à moins de 10 m ³ /h	67%
17	forages testés entre 10 et 30 m ³ /h	18%
11	forages testés entre 30 et 60 m ³ /h	11%
4	forages testés entre 60 et 113 m ³ /h	4%

Illustration 13 : Nombre de forages selon le débit testé

b) Relation lithologie/Débit

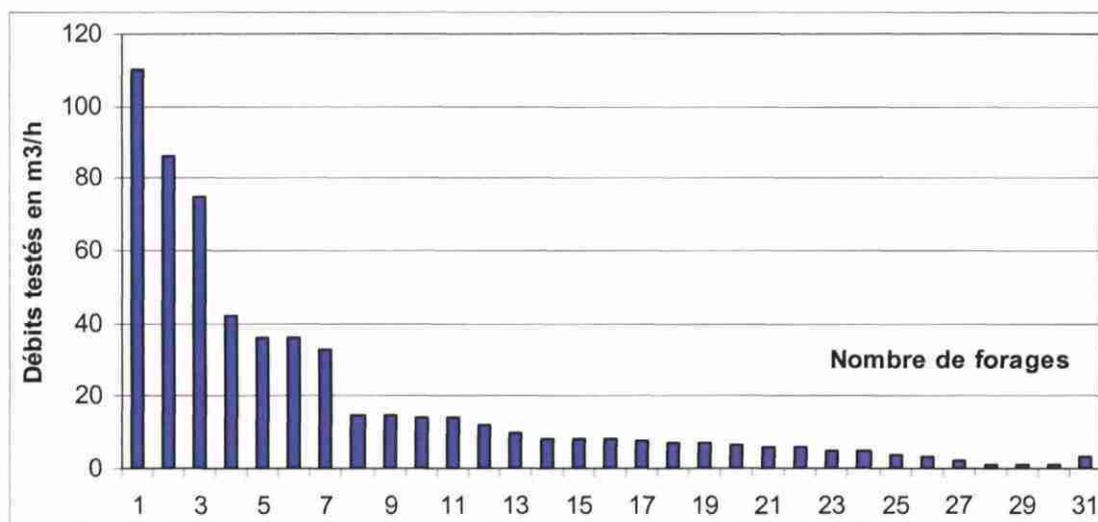


Illustration 14 : Histogramme des débits classés des forages réalisés dans les andésites et les basaltes

31 forages réalisés dans les laves (**andésites et basaltes**) ont été testés à des débits compris entre 1 et 110 m³/h (Illustration 14). Les transmissivités sont variables d'une formation à l'autre, mais sont globalement comprises entre 10⁻³ et 10⁻⁵ m²/s, avec une valeur médiane de 5 10⁻⁴ m²/s.

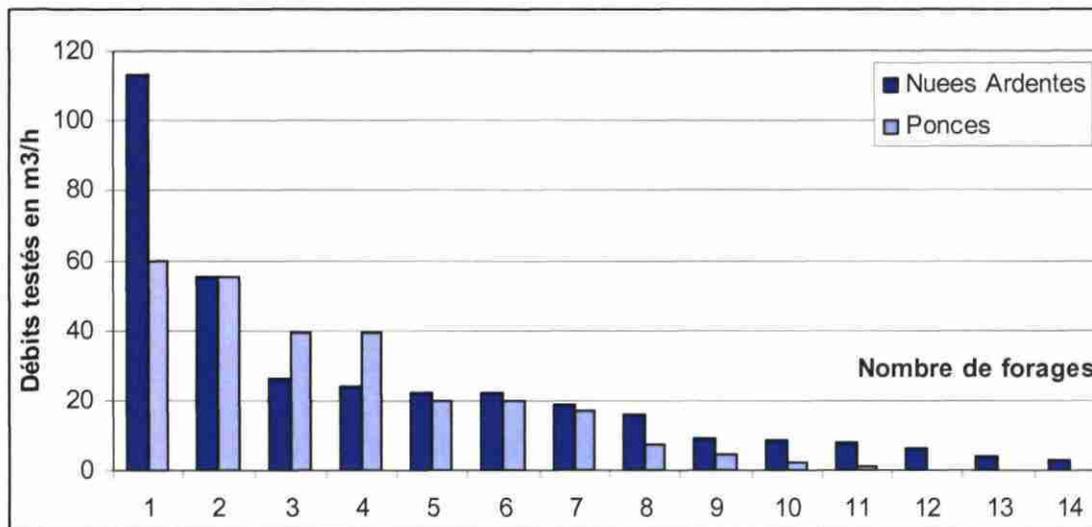


Illustration 15 : Histogramme des débits classés des forages réalisés dans les Nuées Ardentes et les ponces

25 forages réalisés dans les **ponces et nuées ardentes** ont été réalisés à des débits compris entre 1 et 113 m³/h (Illustration 15). Les transmissivités sont variables d'une formation à l'autre, mais sont globalement comprises entre 10⁻² et 10⁻⁴ m²/s, avec une valeur médiane de 2 10⁻³ m²/s.

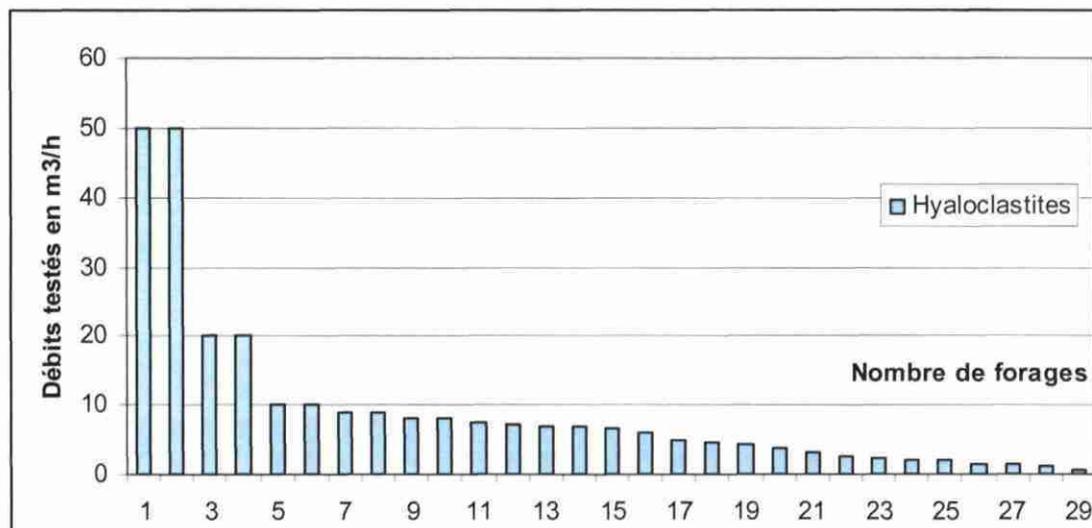


Illustration 16 : Histogramme des débits classés des forages réalisés dans les hyaloclastites

29 forages réalisés dans les **hyaloclastites** ont été réalisés à des débits compris entre 0.5 et 50 m³/h (Illustration 16). Les transmissivités sont variables d'une formation à l'autre, mais sont globalement comprises entre 10⁻³ et 10⁻⁵ m²/s, avec une valeur médiane de 4 10⁻⁴ m²/s. Il faut noter que le débit des hyaloclastites est étroitement lié aux coulées de laves saines interstratifiées en leur sein.

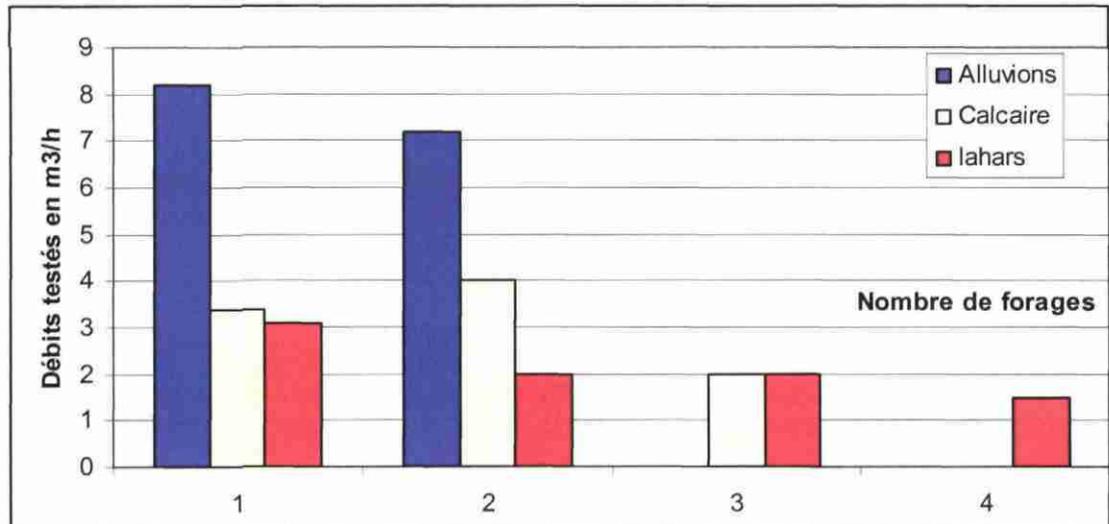


Illustration 17 : Histogramme des débits classés des forages réalisés dans les alluvions, calcaire, conglomérats et lahars

2 forages réalisés dans des **alluvions** ont été testés à des débits de 7.2 et 8.2 m³/h et les transmissivités suivantes ont été calculées : 1.3 et 1.5 10⁻³ m²/s.

3 forages réalisés dans des **calcaires** ont été testés à des débits compris entre 2 et 4 m³/h. Les transmissivités suivantes ont été calculées : 1.2 10⁻⁴ et 2.5 10⁻⁵ m²/s.

Les **lahars** sont des formations considérées comme peu perméables. 4 forages réalisés dans des lahars ont été testés à des débits compris entre 1 et 3 m³/h. Ces 4 forages ont été réalisés au sein de la même formation 6B2 (coulée de débris et de lahars) sur Case Pilote et dans les hauts de Maniba. La notice de la carte géologique explique néanmoins que cette formation n'est pas constituée que de lahars, mais peut aussi présenter des dépôts pyroclastiques auxquels pourraient aussi être attribuées ces valeurs de débit.

Enfin, un forage réalisé dans des **scories** (au Marin) a été testé à un débit de 8 m³/h et un forage réalisé dans des **tourbes** (paléo lac de Champflore) a été testé à un débit de 29 m³/h.

4.3. ELEMENTS SUR LA STRUCTURE DES AQUIFERES DE MARTINIQUE

4.3.1. Les unités constitutives d'aquifères (UCA)

Le concept d'UCA, « Unité Constitutive d'Aquifère », a été défini dans le cadre de ce projet. Il s'agit d'une unité homogène sur les plans géologique et hydrogéologique définie à partir des unités géologiques identifiées sur la carte géologique à 1/50.000 de la Martinique. Ses limites correspondent donc aux limites affleurantes des formations géologiques de la carte à 1/50.000 et, sous couverture de formations géologiques plus récentes, à une extrapolation à partir des données de la carte géologique et des forages.

Les avantages de découper la Martinique en UCA sont les suivants :

- ◆ prise en compte, sans la dégrader, de l'information disponible sur la complexité, l'hétérogénéité, le morcellement et la faible étendue des formations aquifères de Martinique,
- ◆ facilite la description des entités hydrogéologiques en milieu volcanique car, dans un tel contexte, contrairement aux aquifères sédimentaires par exemple, il est difficile d'identifier des entités hydrogéologiques relativement homogènes de grande extension.

Ce concept a conduit à découper la Martinique en 123 UCA, chacune ayant ses propres caractéristiques. Les formations géologiques suivantes (cf. notice de la carte géologique) ont été regroupées au sein d'une même UCA car leur caractéristiques géologiques et hydrogéologiques étaient similaires et ces formations étaient directement superposées :

- ◆ 1902 & 1929
- ◆ P1, P2, P3 & P4
- ◆ NAB1 & NAB2
- ◆ 1 α & 1 β
- ◆ α m1 & β m1
- ◆ α m2b & β m2b
- ◆ α m2c et β m2c
- ◆ ahb et ra

Les unités non aquifères ont été identifiées comme des UCAs n'ayant pas de débit potentiel instantané par forage. Elles sont caractérisées par la notation « Sans objet » et un commentaire indique le caractère non aquifère (faiblement perméable) de l'unité considérée. Les unités géologiques suivantes ont été considérées comme non aquifères :

- les Mangroves RFM,
- les calcaires du Céron p-IV,
- les coulées de ponces P1, P2, P3, P4, P5, P8,
- les brèches 9B du Morne Larcher,
- les grès volcaniques argileux 11D,
- les lahars 8lh.

a) La base de données

A chaque UCA a été rattachée une base de données qui comporte les informations suivantes :

- lithologie dominante (selon un dictionnaire normalisé),
- débit potentiel instantané que pourrait donner un forage réalisé au sein de cette formation,
- probabilité de réussite d'un forage réalisé au sein de cette formation,
- type de porosité de la formation géologique considérée (interstices, fissures, fractures, karstique),
- un commentaire si nécessaire (niveau de connaissance, avis sur les potentialités, etc.).

Ces informations ont été renseignées à partir des données géologiques et hydrogéologiques disponibles.

b) Délimitation des UCA

Le principal objectif de la définition des UCA est de pouvoir représenter, au sein d'un SIG, les formations géologiques aquifères et de disposer facilement des informations hydrogéologiques les concernant.

Une UCA est délimitée sur la base de l'interprétation de l'ensemble des informations géologiques et, le cas échéant, hydrogéologiques disponibles (carte géologique, notice, forages, bibliographie), afin notamment de figurer l'extension de ces unités sous recouvrement de formations plus récentes.

Les principes généraux suivants ont été mis en œuvre :

- en l'absence de données disponibles pour justifier l'extension latérale d'une formation géologique sous recouvrement, les schémas structuraux proposés par Andrieff et al. (1988 ; cf.. Illustration 10) ont été utilisés. Cette démarche a

principalement été mise en œuvre pour les formations géologiques jouant un rôle de « substratum géologique » à l'échelle d'un secteur donné de la Martinique, comme par exemple les formations 1H, pβm2a ou Hm2a.

- La géométrie des formations sous recouvrement a été définie par interpolation et, le cas échéant, par extrapolation, entre affleurements de la carte géologique proches les uns des autres. Les interpolations et extrapolations se sont fondées sur les principes classiques de cartographie géologique en milieu volcanique, considérant notamment la présence de structures chenalisées de type « paléovallées ».
- Pour les formations considérées comme ne constituant pas un « substratum », et lorsque, faute d'informations suffisantes quant à leur extension spatiale, il est délicat de procéder à des extrapolations, une hypothèse d'extension minimaliste a été retenue. Cela revient à considérer que les formations sus-jacentes se sont mises en place postérieurement à l'érosion des plus anciennes, ce qui est une hypothèse assez souvent vérifiée en milieu volcanique.
- Ont été regroupées au sein d'une même UCA des formations mises en place successivement d'après la carte géologique et présentant une lithologie similaire : par exemple quatre coulées de ponces successives, ou deux nuées ardentes successives, ou une coulée d'andésite et une coulée de basalte successives et superposées (cf. chapitre 4.3.1. ci-dessus pour la liste exhaustive des formations regroupées).
- Les dômes de laves ont été classés a priori comme aquifères (même si certains d'entre eux ne renferment peut être pas de nappe).

c) Estimation du débit potentiel instantané par forage au sein d'une UCA

A chaque UCA a été attribuée une fourchette de « débit potentiel instantané » parmi la gamme suivante :

- 30 à 60 m³/h, avec un débit moyen par ouvrage de 45 m³/h,
- 10 à 30 m³/h, avec un débit moyen par ouvrage de 20 m³/h,
- 5 à 10 m³/h, avec un débit moyen par ouvrage de 7.5 m³/h,
- 2 à 5 m³/h, avec un débit moyen par ouvrage de 3.5 m³/h,
- < 2 m³/h,
- Sans Objet (cf. chapitre 4.3.1. ci-dessus pour la liste exhaustive des formations classées sans objet).

Ce débit correspond au débit que pourrait fournir la formation aquifère considérée au cours d'un pompage de quelques heures, réalisé au sein d'un forage productif, c'est-à-dire implanté au sein d'un secteur perméable de la formation aquifère (en milieu volcanique, une même formation géologique, considérée globalement comme aquifère, peut en effet comprendre des faciès perméables et d'autres peu ou très peu perméables, cf. Chapitre 2.2), recoupant celle-ci sur une hauteur mouillée significative (plusieurs mètres au moins) et ayant été réalisé selon les règles de l'art.

Il ne s'agit pas d'un débit d'exploitation à long terme défini d'une part en fonction des caractéristiques hydrodynamique du couple nappe/forage et, d'autre part, des conditions de réalimentation de l'aquifère (aptitude de la nappe à la gestion active notamment).

Ces débits ont été définis « à dire d'expert » principalement en fonction des études et pompages d'essai ayant été réalisés sur les différents forages existant en Martinique (cf. chapitre 4.2). Des extrapolations ont été réalisées en fonction des connaissances disponibles sur la lithologie et la structure de la formation géologique constitutive de l'UCA.

d) Estimation de la probabilité de réussite

On entend par probabilité de réussite d'un forage la probabilité d'obtenir le débit potentiel instantané défini ci-dessus. Cette probabilité est divisée en 3 classes :

- ◆ Faible probabilité de réussite : sur 1 km², on estime qu'il n'y a qu'**une configuration** géologique et hydrogéologique favorable permettant d'obtenir le débit potentiel instantané indiqué.
- ◆ Moyenne : sur 1 km², on estime qu'il y a **plusieurs configurations** géologique et hydrogéologique favorables permettant d'obtenir le débit potentiel instantané indiqué.
- ◆ Bonne : sur 1 km², on estime qu'il y a **de nombreuses configurations** géologique et hydrogéologique favorables permettant d'obtenir le débit potentiel instantané indiqué.

e) Caractérisation du type de porosité des UCA

Les formations aquifères présentent différents types de porosité (nature des vides au sein desquels peuvent circuler les eaux souterraines) en fonction de leur lithologie originelle et des processus qu'elles ont pu subir (fracturation notamment) (cf. chapitre 2.2).

En Martinique, les principaux types de porosités suivants ont été identifiés :

- ◆ porosité d'interstices : porosité due à l'existence de pores, d'interstices interconnectés (cf. porosité ouverte) d'origine en général primaire. Ont été classées dans cette catégorie les nuées ardentes, les ponces et les alluvions,
- ◆ porosité de fissures : porosité due à l'existence de fissures ouvertes, d'origine en général secondaire : l'écoulement de la lave est à l'origine de figures de flux qui se traduisent fréquemment par une fissuration de la roche avec un débit en plaquettes, souvent parallèles au substratum. Le refroidissement de la lave génère lui aussi une fissuration en forme de prismes (prismation) avec des fissures en général perpendiculaires à la surface de refroidissement.
- ◆ porosité de fractures : porosité due à l'existence diaclases ouvertes, d'origine en général secondaire : fracturation d'origine tectonique.

La base de données associée aux UCA renseignera donc, pour chacune d'entre elles, sur la typologie de sa porosité/perméabilité, en fonction des informations disponibles : forages ayant été réalisés dans cette formation, indices indiqués au sein de la notice de la carte géologique, archives, indices de terrain ayant pu être observés.

f) Représentation cartographique des UCA

Les UCA ont ensuite été regroupées par niveaux, en fonction de leurs positions relatives : elles se répartissent sur 5 niveaux « superposés » : le niveau 1 correspond aux formations affleurantes, le niveau 2 correspond aux formations situées sous les formations de niveau 1, et ainsi de suite comme le montre l'illustration 18. Chaque unité est ainsi redécoupée selon son niveau de superposition (niveau « stratigraphique »).

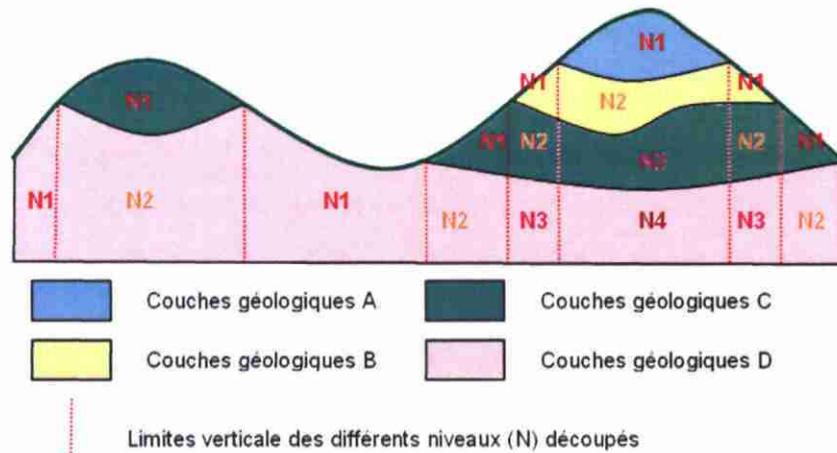


Illustration 18 : Principe de découpage en niveau des unités hydrogéologiques

Pour chacun des 5 niveaux, les UCA ayant les mêmes caractéristiques hydrogéologiques (lithologie, débit potentiel instantané, probabilité de réussite et type de réservoir) ont été regroupées au sein d'un même ensemble.

Les cartes suivantes représentent les UCA ainsi calculées ; ce sont ces 5 couches d'informations qui ont été intégrées au sein du SIG.

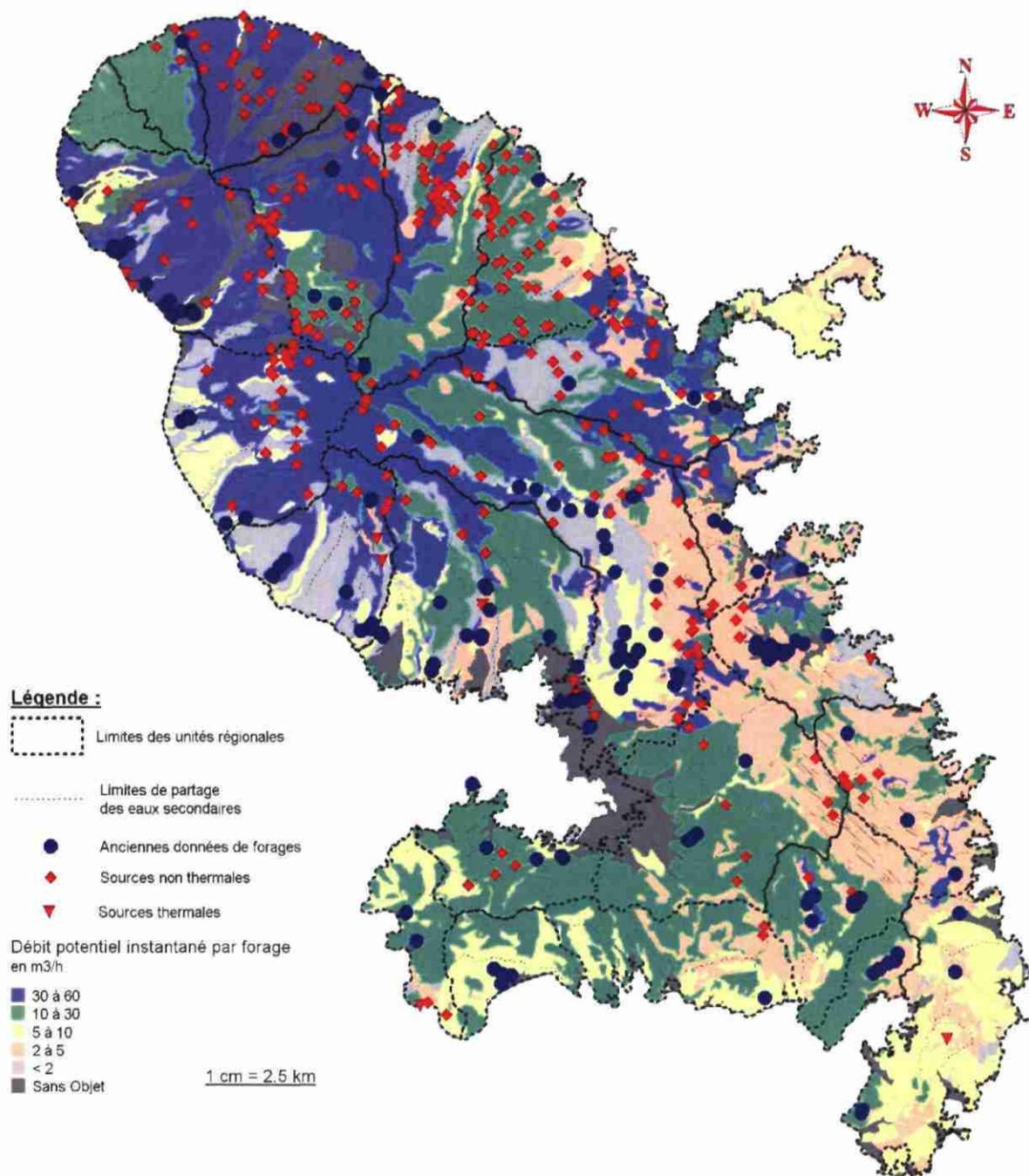
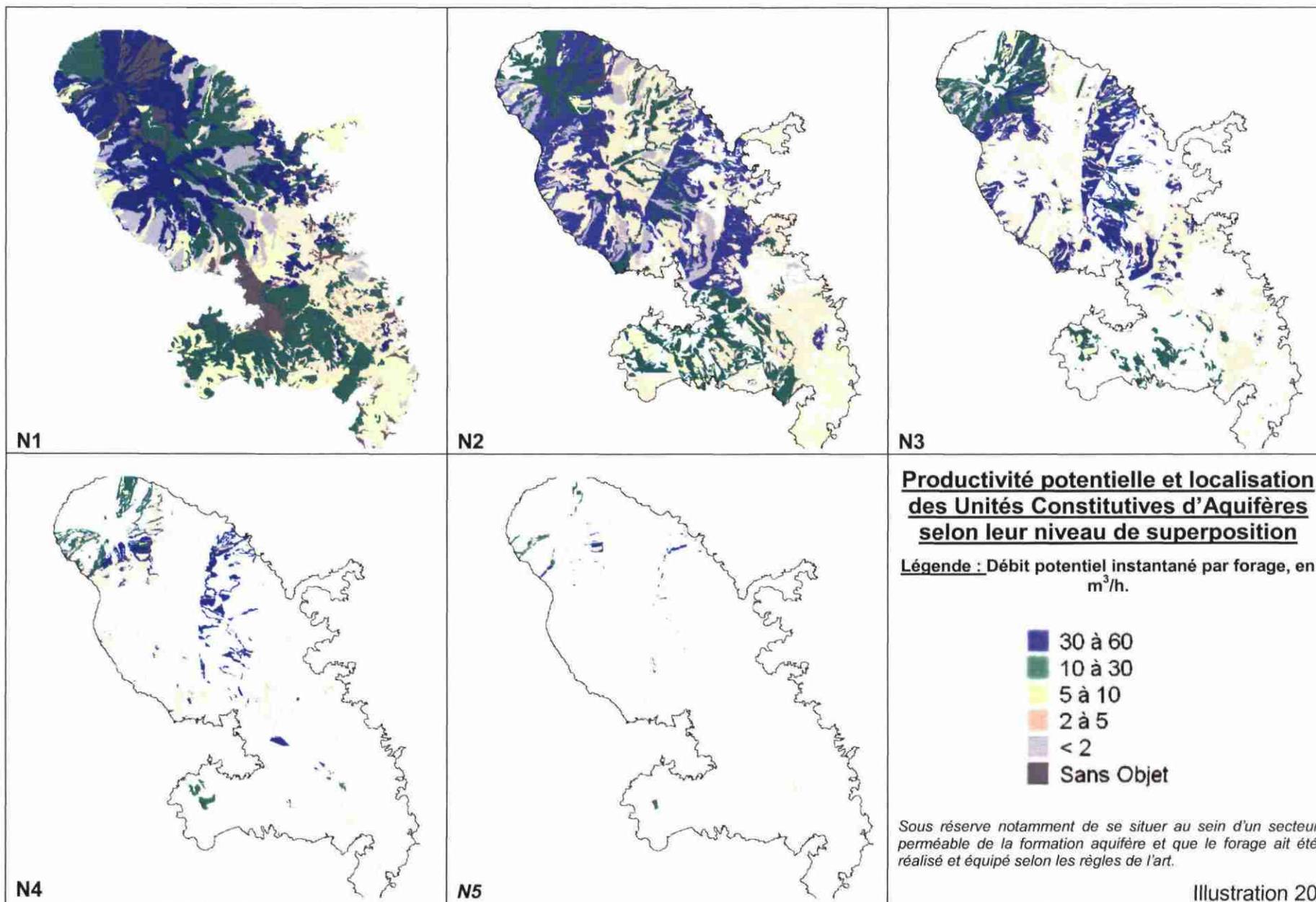


Illustration 19 : Débit potentiel instantané par forages, pour les unités de niveau 1 (formations affleurantes).



4.3.2. Caracterisation de l'alteration

Les principaux processus d'alteration affectant l'hydrogeologie de la Martinique sont decrits dans le chapitre 2.3.3. D'une maniere generale, les processus d'alteration sont susceptibles de reduire la permeabilite des roches qu'ils affectent.

a) L'alteration hydrothermale et anchimetamorphisme

L'alteration hydrothermale est liee principalement a des circulations de fluides chauds au sein des roches. Elle est donc particulierement frequente en contexte volcanique. Aucune etude specifique et generale n'a ete realisee en Martinique afin de localiser les lieux affectes par ce phenomene. Un certain nombre de secteurs plus particulierement concernes sont neanmoins identifies sur la carte geologique a 1/50.000 et decrits dans la notice.

Une couche du SIG represente les zones de metamorphisme ainsi identifiees. Il s'agit des zones a heulandites, stilbites, clinoptilotite et laumontites, ainsi que l'enveloppe des anomalies en gaz (Rd, CO₂, He), mercure et arsenic, dans les sols identifiees au Lamentin. *Pour plus de details on pourra se referer a la notice de la carte geologique de Martinique (p 183 a 193).*

Concernant les sources thermales, un inventaire bibliographique a ete realise. Elles ont ete integrees au sein de la couche SIG des sources.

L'information disponible sur l'alteration hydrothermale est aussi presentee au sein de la base de donnees associee aux forages. Pour chaque forage, lorsque cette information est mentionnee sur la coupe geologique, la profondeur de la zone alteree est indiquee, ainsi que la formation geologique affectee.

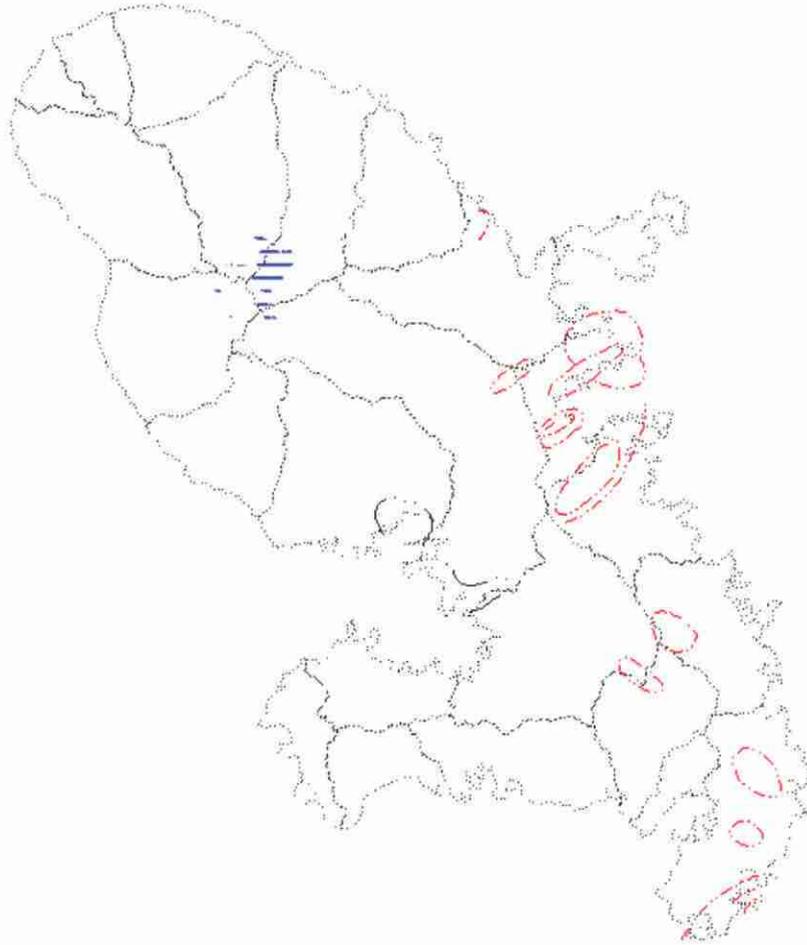


Illustration 21 : Altérations hydrothermales et anchimétamorphiques

b) L'altération climatique

L'altération météorique est particulièrement présente en milieu tropical humide. Elle affecte tout particulièrement les formations géologiques ayant été exposées en surface au cours de longues durées.

L'information disponible sur l'altération climatique est présentée au sein de la base de données associée aux forages. Pour chaque forage, lorsque cette information est mentionnée sur la coupe géologique, la profondeur de la zone altérée est indiquée, ainsi que la formation géologique affectée.

4.3.3. La carte des failles

Une carte des failles est intégrée au sein du SIG. Elle correspond aux failles indiquées sur la carte géologique de la Martinique.

Il n'a pas été porté d'appréciation sur le rôle hydrogéologique que peuvent jouer les failles à l'échelle du SIG. Celles-ci peuvent en effet constituer des secteurs privilégiés de développement d'une perméabilité de fractures ou, à l'inverse, former des configurations favorables au développement de l'altération (climatique ou hydrothermale), donc de faible perméabilité. Cette problématique doit donc être traitée à une échelle plus fine (jusqu'au 1/10.000 environ).

L'information apportée dans la base de données associée à cette couche correspond à la description indiquée sur la légende de la carte géologique :

- ◆ Faille observée, visible, de cinématique non précisée
- ◆ Faille supposée, masquée, hypothétique, de cinématique non précisée
- ◆ Faille normale, visible, avec indication du compartiment abaissé



Illustration 22 : Carte des failles, selon la carte géologique au 1/50000^{ème}

4.4. ELEMENTS SUR LE FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES DE MARTINIQUE

Des elements de caracterisation du fonctionnement des aquiferes de Martinique ont aussi ete integres au sein du SIG. Ces elements sont decrits au sein du present chapitre selon un plan qui suit globalement celui du cycle de l'eau : entrees (infiltration) au sein des aquiferes, modalites de circulation des eaux souterraines en leur sein, sorties d'eau souterraine. Ces modalites de fonctionnement permettent notamment de definir les limites des aquiferes et de caracteriser la nature de celles-ci.

Le fonctionnement de chacun des aquiferes de Martinique n'etant pas connu dans le detail, et le degre de cette connaissance pouvant etre variable d'un aquifere a l'autre, ces elements de connaissance ne sont pas necessairement homogenes a l'echelle de l'ensemble de la Martinique. Contrairement a ce qui concerne la structure des aquiferes, le renseignement, au sein du SIG, des informations relatives a leur fonctionnement n'est donc pas homogene a l'echelle de l'ile.

En Martinique, les entrees sont aujourd'hui considerees comme generalisees a toute la surface des nappes libres, ainsi qu'aux zones d'affleurement des nappes captives (partie libre des nappes captives). L'alimentation des aquiferes peut aussi se faire par des processus de drainance, notamment au travers de formations semi-permeables (formations sus- ou sous-jacentes a l'aquifere, considerees comme non aquiferes, telles que les formations superficielles : alluvions, colluvions, franges alterees des roches constituant les aquiferes, etc.) ou dans le cadre des echanges « rivières vers nappe » (les cours d'eau non perennes du flanc ouest de la Montagne Pelée constituent ainsi un exemple bien representatif de ce type de configuration). L'exploitation ou la mise en exploitation de certains aquiferes est susceptible d'augmenter (en termes de debit echange et d'extension spatiale des zones d'echange) ces echanges par drainance et par les relations rivières-nappes.

En Martinique, la plupart des sorties d'eau souterraine en provenance des nappes sont d'origine naturelle : les prelevements par pompage, qui constituent aussi des sorties, sont pour l'instant tres reduits (seulement 4 forages sont actuellement exploites). Les sorties naturelles des aquiferes s'operent d'une part et principalement par des apports diffus aux eaux de surface : cours d'eaux essentiellement, rivages maritimes (littoral) dans une moindre mesure et, d'autre part, de maniere ponctuelle au droit des sources. Certaines zones humides materialisent aussi ces echanges nappes / eaux de surface.

Conditions aux limites des aquiferes

La caracterisation du fonctionnement des aquiferes permet notamment de definir leurs conditions aux limites. Celles-ci peuvent principalement etre representees par des points (sources) ou par des lignes (par exemple les limites a potentiel impose ou a flux impose que constituent les cours d'eau drainant ou infiltrant, le littoral). Les principaux types de limites ainsi identifiees en Martinique et representees au sein du SIG sont les suivantes (la classification proposee s'inspire des travaux de Margat, 2000) :

- limites étanches (flux nul), imposées par la structure géologiques et/ou, dans la majorité des cas, par les limites de bassin versant souterrain (cf. méthodologie d'établissement présentée ci-dessous § 4.4.2) ;
- limites à potentiel imposé (constant ou variable dans l'espace et dans le temps), imposées par les conditions extérieures (environnement de l'aquifère). Elles sont identifiées :
 - soit par une courbe équipotentielle ou hydro-isohypse de la surface piézométrique ; les sources constituent un cas de figure où cette courbe équipotentielle est limitée à un point,
 - soit par une courbe de potentiel variable spatialement : cours d'eau.

4.4.1. Alimentation des aquifères (entrées)

Comme indiqué ci-dessus, **les pluies efficaces** constituent le principal processus conduisant à l'alimentation des aquifères. Leur calcul sera présenté dans le chapitre 1.1.1.c)

Cours d'eau infiltrant

Un figuré spécifique représente les cours d'eau (ou portions de cours d'eau) infiltrant, c'est-à-dire les cours d'eau qui alimentent les eaux souterraines par échanges « rivières vers nappes ».

En Martinique, ce type de cours d'eau ou de portion de cours d'eau est essentiellement identifié, à « grande échelle » (cf. paragraphe suivant), dans le secteur de Saint Pierre, où les contextes géologique, avec notamment la présence de nuées ardentes très perméables, et topographique (pente forte, gradient hydraulique favorisant une déconnexion entre le cours d'eau et la nappe ou, tout au moins, des échanges rivières vers nappes) favorisent l'infiltration des eaux des cours d'eau vers les eaux souterraines et participent ainsi de manière significative à la recharge des nappes. Il en résulte des cours d'eau non pérennes (qui ne sont complètement fonctionnels qu'en période de hautes eaux, lorsque le débit d'alimentation du cours d'eau – précipitations, écoulements hypodermiques, etc. - est supérieur aux pertes par infiltration).

Des infiltrations locales des eaux de surface vers les eaux souterraines sont connues et/ou probables au sein de nombreux autres cours d'eau de Martinique. Ces cours d'eau présentent d'une manière générale un comportement drainant. Seules des conditions locales peuvent expliquer un comportement infiltrant : notamment au sein de la partie amont, à forte déclivité, de certaines ravines, au droit d'inversions locales des conditions d'échange entre la nappe et le cours d'eau considéré, etc. Compte tenu de leur échelle locale et de l'échelle de travail adoptée, ces processus ne sont pas représentés sur la cartographie présentée au sein de ce rapport.

4.4.2. Limite des bassins versants hydrogéologiques. Concept d'unités régionales

a) Limites des bassins versants hydrogéologiques

Les conditions topographiques, géologiques, hydrologiques et, in fine, hydrogéologiques de la Martinique concourent, dans la plupart des régions de l'île, à une bonne concordance, à l'échelle de travail du projet, entre bassins versants topographiques (concernant les écoulements des eaux de surface) et bassins versants souterrains (concernant les écoulements d'eau souterraine). Parmi ces conditions, on peut noter :

- la perméabilité relativement modeste, au moins « en grand », des formations géologiques, qui conduit à ce que les niveaux piézométriques suivent assez fidèlement la topographie et, par voie de conséquence, à ce que les cours d'eau soient principalement drainants (cf. § 4.4.1 notamment). La plupart des cours d'eau drainent donc les nappes qui leurs sont adjacentes ;
- l'extension modeste, au sein des formations géologiques considérées comme perméables, des faciès les plus perméables (niveaux fissurés par exemple) favorise les échanges locaux, notamment avec les structures de drainage que constituent les cours d'eau ou les sources (à quelques exceptions près, cf. ci-dessous, les sources présentent un débit modeste (cf § 1.1.1.a) et se caractérisent donc par un bassin versant d'alimentation de taille réduite) ;
- la topographie en général très accusée, qui se traduit par des versants aux fortes pentes, des dénivelés importants entre lignes de crêtes et talwegs et, en général, des lignes de crêtes aigues. Ces caractéristiques topographiques favorisent elles aussi un drainage privilégié des aquifères par les cours d'eau.

Ces observations sont confirmées par les mesures piézométriques disponibles ; les illustrations ci-dessous proposent un traitement des données de la base de données BSS pour 121 forages (nombre de forages pour lesquels les niveaux d'eau sont référencés). Ils présentent une corrélation entre l'altitude du sol et l'altitude du niveau piézométrique pour chacun des forages pour lesquels l'information était disponible, et ne tiennent pas compte des forages artésiens pour lesquels la hauteur d'eau n'a pas pu être mesurée.

Ces illustrations montrent en effet une **bonne concordance entre les niveaux piézométriques et la surface topographique**. Le niveau piézométrique se situe en moyenne à 6.5 m en dessous de la surface topographique. La seule exception notable s'explique par le contexte hydrogéologique particulier de la nappe et des forages de Pecoul (altitude du sol aux alentours de 80 m avec un niveau piézométrique vers 30 m).

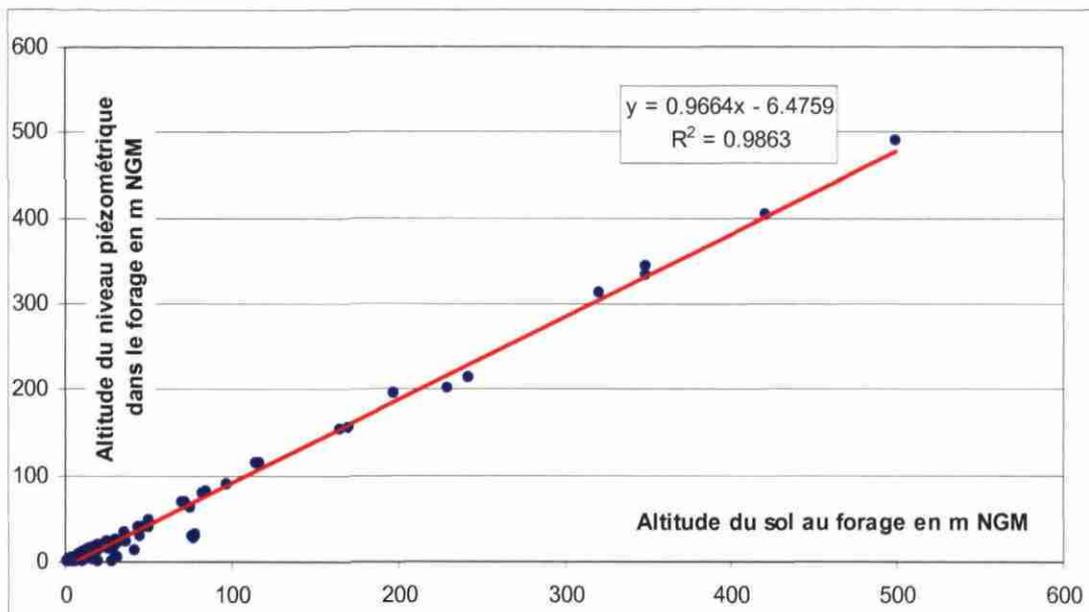


Illustration 23 : Corrélation entre altitude des forages et altitude du niveau piézométrique

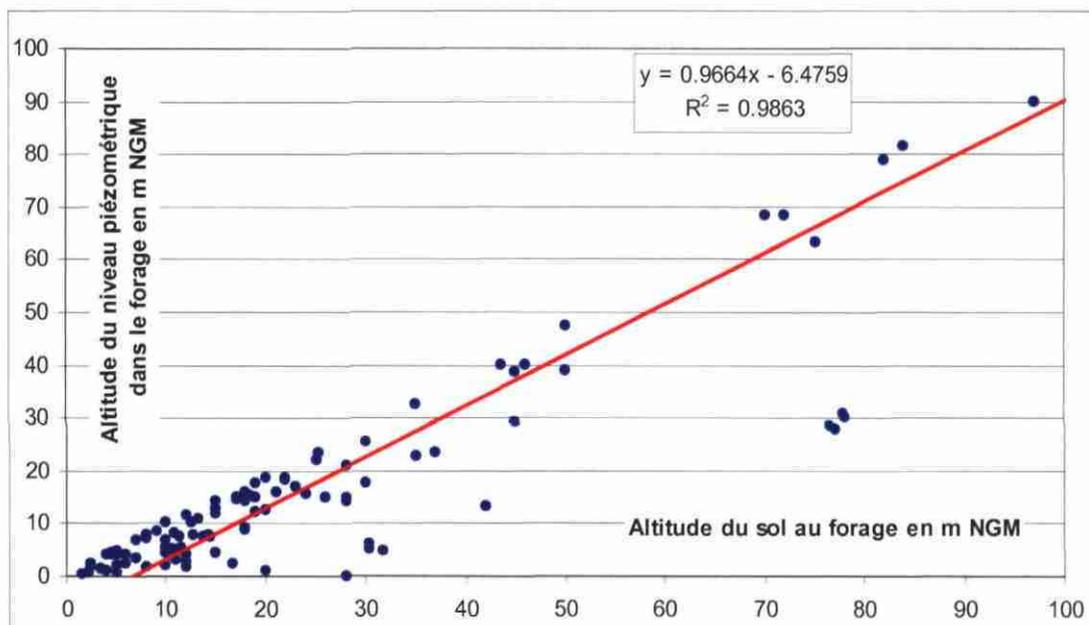


Illustration 24 : Corrélation entre altitude des forages et altitude du niveau piézométrique, zoom sur la zone 100m /100m

Les limites des principaux bassins versants topographiques ont donc été figurées au sein du SIG. On considèrera qu'elles sont bien représentatives, à l'échelle d'élaboration du SIG, des limites de partage des eaux souterraines, donc de celles des principaux bassins versants hydrogéologiques, l'échelle de travail (1/50 000) ne

permettant pas la résolution des hétérogénéités locales au sein de chaque ensemble. La délimitation correspond aux principaux bassins versants côtiers.

Quelques contre-exemples à cette règle générale peuvent néanmoins être cités, notamment au sein de formations volcaniques relativement récentes ayant conservé de bonnes propriétés de perméabilité en grand :

- les quelques sources aux débits les plus élevés de Martinique (source Morestin sur la commune du Morne Rouge, source Attila sur la commune du Morne Vert) auraient des bassins versants souterrains ne présentant que peu de liens avec le modelé de surface. Le bassin versant souterrain de la source Attila est mal connu ; la surface de son bassin versant topographique est quasiment nulle, la source émergeant en pied d'un versant à très forte pente. Une évaluation effectuée sur la base du débit estimé de la source (cf. Lachassagne, 2003) suggère qu'il peut comprendre une part importante du massif des pitons du Carbet. Le bassin versant d'alimentation de la source Morestin n'est lui non plus pas connu actuellement ; il devrait faire l'objet d'investigations sous l'égide du SCCNO et du Conseil Général dans les mois à venir. Là encore, le bassin versant topographique de la source présente une superficie plutôt réduite et il est probable que son bassin versant souterrain s'étende de manière significative vers l'amont, au sein de paléovallée(s) relativement récente(s) de la Montagne Pelée ;
- quelques autres sources aux débits légèrement moins importants, mais émergeant aussi de formations volcaniques récentes, dont la particularité est de constituer des lignes de crêtes, notamment la source Yang-Ting sur la commune de Fond Saint Denis (cf. Lachassagne, 2003) ou les sources se trouvant dans le secteur de Champflore (Source Piton Gelé, source Lafort, source du Mont Béni, etc.) présentent très vraisemblablement des bassins souterrains dont les limites ne coïncident pas a priori avec la topographie de surface, et notamment avec les lignes de crêtes.

Ces quelques exemples montrent que les hypothèses qui ont été retenues pour réaliser le travail du découpage des unités régionales au 1/50 000^{ème} peuvent présenter localement, et à une échelle beaucoup plus petite, de légères différences par rapports aux bassins versants hydrogéologiques sous-jacents. Seules des études hydrogéologiques locales approfondies permettraient d'apporter les éléments nécessaires à une meilleure définition des limites de certains aquifères complexes.

Les contre-exemples cités ci-dessus n'ont pas été représentés au sein du SIG, afin de garder la même méthodologie de découpage pour l'ensemble de la Martinique.

b) Découpage des Unités Régionales

24 unités régionales ont été définies par agrégation des bassins versants dont la délimitation a été présentée ci-dessus, en respectant le principe d'un découpage conforme à celui des masses d'eau souterraines définies en 2003 (BRGM/RP-52688), sachant qu'une masse d'eau est susceptible de comporter plusieurs unités régionales.

Pour plus de détail sur les limites des unités régionales, on se référera à la couche SIG correspondante, ainsi qu'à l'illustration présentée ci-dessous.

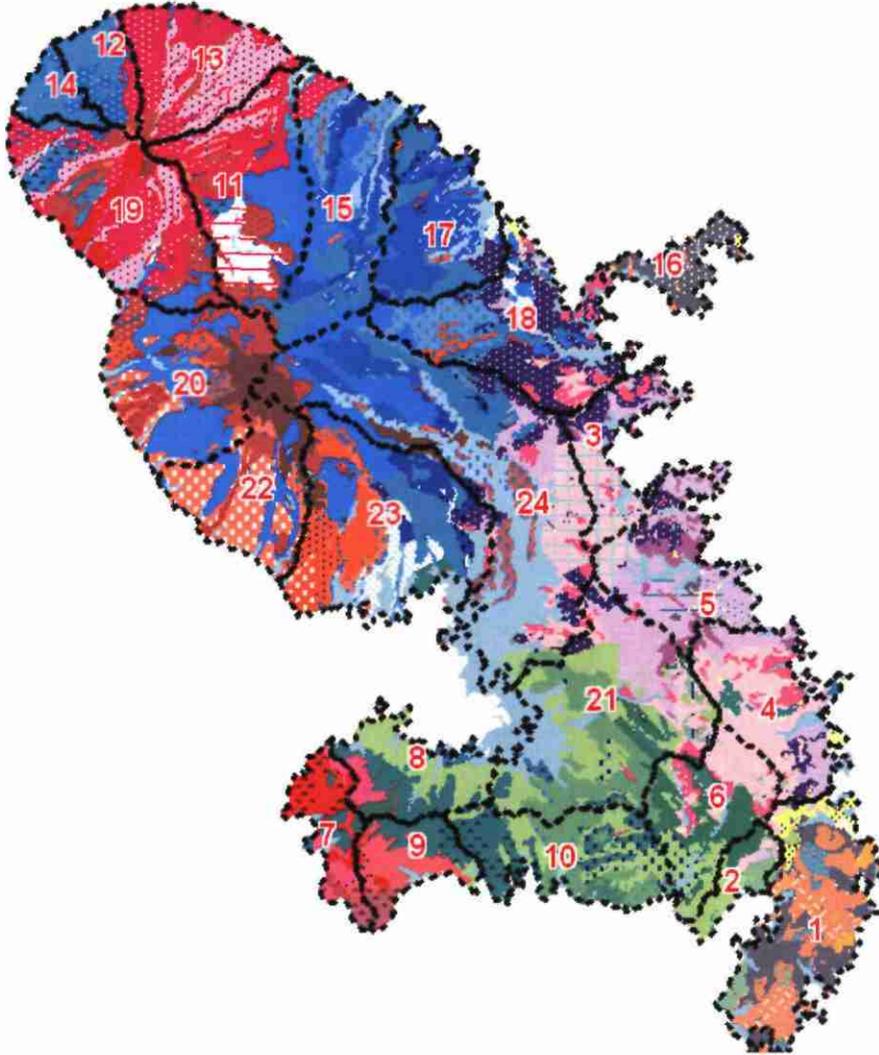


Illustration 25 : Carte des unités régionales (avec le numéro de chaque UR), sur fond de la carte géologique au 1/50000^{ème}

c) Base de donnée associée aux Unités Régionales

La base de données associée aux Unités Régionales (UR) au sein du SIG est la suivante :

- Nom de l'Unité Régionale (UR)
- Numéro de l'UR
- Superficie en km²
- Pluie efficace (en mm)

- Part d'écoulement rapide (en % et en mm)
- Part d'eau infiltrée (en % et en mm)
- Part de l'eau infiltrée se vidangeant en rivière (en % et en mm)
- Part de l'eau infiltrée s'écoulant en mer (en % et en mm)
- Surface de l'unité utilisable pour la réalisation de forages (en % et en km²)
- Surface occupée par des formations potentiellement aquifères de niveau 1 pouvant fournir un débit par ouvrage de 45 m³/h, en km².
- Surface occupée par des formations potentiellement aquifères de niveau 1 pouvant fournir un débit par ouvrage de 20 m³/h, en km².
- Surface occupée par des formations potentiellement aquifères de niveau 1 pouvant fournir un débit par ouvrage de 7.5 m³/h, en km².
- Surface occupée par des formations potentiellement aquifères de niveau 1 pouvant fournir un débit par ouvrage de 3.5 m³/h, en km².
- Nombre de forages réalisables dans l'unité, pouvant fournir un débit par ouvrage de 45 m³/h.
- Nombre de forages réalisables dans l'unité, pouvant fournir un débit par ouvrage de 20 m³/h.
- Nombre de forages réalisables dans l'unité, pouvant fournir un débit par ouvrage de 7.5 m³/h.
- Nombre de forages réalisables dans l'unité, pouvant fournir un débit par ouvrage de 3.5 m³/h.
- Volume ainsi prélevé dans l'unité, en m³/j et en mm (sur la base d'une exploitation 20h24)
- Impact sur les sorties en mer (% indiquant la diminution de ces sorties)
- Impact sur les sorties en rivières (% indiquant la diminution de ces sorties)
- Part supplémentaire prélevée sur l'écoulement rapide nécessaire à la recharge de l'aquifère en saison des pluies (gestion active)

La méthodologie de définition des paramètres correspondant à la ressource potentielle et à son exploitabilité (cf. lignes 4 et suivantes ci-dessus) est explicitée dans le chapitre 6.

4.4.3. Exutoires des eaux souterraines

Les exutoires des eaux souterraines vers la surface sont soit ponctuels : sources (continentales ou plus rarement marines), soit diffus : lignes de suintement, alimentation de cours d'eau (dits drainant), fuites diffuses en mer.

a) Les sources

Deux couches d'information « sources » figurent au sein du SIG :

- les sources non thermales
- les sources référencées comme sources thermales et/ou minérales au sein des différentes données bibliographiques.

Aucune source d'eau douce sous-marine n'a été précisément référencée et caractérisée en Martinique. Il existerait néanmoins de telles émergences en mer (dont certaines seraient thermales) entre Saint-Pierre et Le Prêcheur, qui constitueraient l'exutoire des nappes des formations pyroclastiques de la Montagne Pelée. A l'échelle de la Martinique, les principaux échanges littoraux entre les nappes et la mer se feraient donc généralement de manière diffuse.

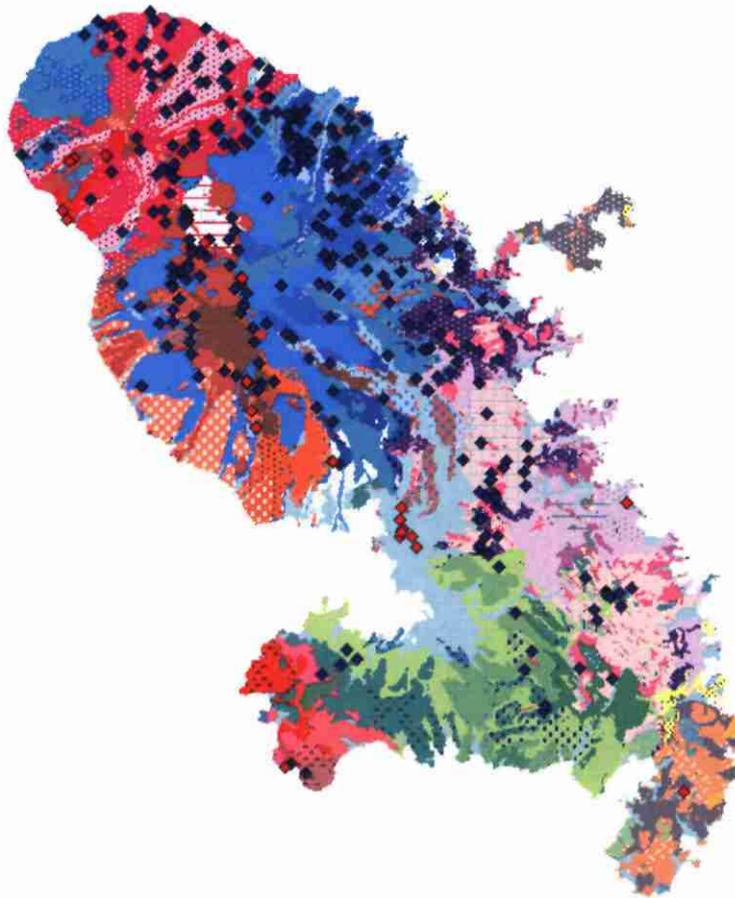


Illustration 26 : Localisation des sources thermales et/ou minérales (en rouge) et des sources non thermales (en bleu), sur la carte géologique au 1/50000^{ème}

Les bases de données

La base de données associée aux sources non thermales comporte les informations suivantes :

- ◆ **Caractéristiques géographiques :**
 - nom et/ou code BSS
 - Commune, lieu dit, coordonnées X, Y et Z
 - Origine de la donnée : BRGM, DSDS, DAF, CG, IGN
 - Usage
- ◆ **Caractéristiques hydrogéologiques :**
 - Débit si connu ou mesuré
 - Couche géologique à laquelle la source est rattachée.

L'origine de la donnée est un élément important permettant de caractériser la précision de l'information. En effet, les sources référencées dans la couche « Sources » figurant au sein du SIG correspondent à une synthèse de différentes bases de données existantes. Il s'agit des sources déclarées au sein de la BSS, ainsi que des sources citées dans les différents rapports BRGM archivés, des sources « bord de route » recensées par la DSDS, des sources déclarées à la DAF comme étant captées pour l'irrigation, des sources captées pour l'AEP (données fournies par le Conseil Général) et enfin des sources indiquées en tant que tel sur la cartographie IGN à 1/25.000è (mais non validées sur le terrain).

L'information sur le débit doit être prise avec circonspection, compte tenu de sa validité relative. En effet, même si certains débits ont été mesurés avec précision et sont relativement bien estimés (sources AEP par exemple), certains autres correspondent à une seule mesure indiquée en archive (1976 pour les sources thermales et/ou minérales notamment) ou alors à une déclaration administrative (sources DAF pour l'irrigation par exemple).

L'information « Couche géologique » est uniquement la résultante d'un croisement cartographique et est donc aussi à prendre avec circonspection. Pour affiner cette donnée, chaque source nécessiterait que soit caractérisé in situ son contexte géologique et hydrogéologique. Néanmoins, les sources pour lesquelles cette attribution présente une incertitude se caractérisent par un faible débit, donc par un faible enjeu.

Sur la base de cet inventaire **354 sources** ont ainsi été identifiées au sein de la couche SIG « sources non thermales ».

Parmi ces 354 sources, peu ont des débits importants supérieurs à quelques mètres cubes par heure (dont la plupart sont captées pour l'AEP ou pour l'embouteillage, les trois plus importants sites étant la source Morestin, la source Attila et les sources de Champfore (s.l.)).

Outre les sources thermales ayant un contexte d'émergence spécifique, la plupart des sources présentent de faibles débits correspondant généralement à des débordements de nappes de formations superficielles et d'extensions limitées (d'où leur faible débit et leur tarissement rapide). Elles peuvent aussi matérialiser des hétérogénéités au sein d'une même formation géologique, non apparente ou non figurée à l'échelle de travail (1/50.000^{ème}).

La base de données associée aux **29 sources thermales et/ou minérales** comporte comme informations complémentaires par rapport aux sources non thermales :

- o La température de l'eau
- o Le faciès physico-chimique
- o Le type d'eau (thermale et/ou gazeuse et/ou minéralisée / très minéralisée)
- o Le type de formation géologique à l'émergence

b) Ecoulement des eaux souterraines : cartes piézométriques

Des cartes piézométriques ont été établies pour les aquifères ou portions d'aquifères sur lesquels des données piézométriques étaient disponibles en quantité suffisante.

• Carte piézométrique du secteur de Saint-Pierre entre Pécoul et Fond Canonville

- 12 forages ont été réalisés sur ce secteur depuis les années 70. La plupart n'existent plus (rebouchés, détruits, abandonnés, non retrouvés), mais les données ont été conservées dans les archives de la Banque du Sous Sol (BSS) du BRGM.

Le tableau de l'illustration 27 ci-dessous récapitule les données utilisées pour réaliser la carte piézométrique (Illustration 28).

N_BSS	Lieu_Dit	N Piézo (m NGM)	Date mesure	Précision estimée	Source
1167ZZ0008	FOND-CANONVILLE	31	1979	2 m	BSS
1167ZZ0021	CORRE 1	5.3	1981	2 m	BSS
1167ZZ0022	CORRE 2	10.5	1981	2 m	BSS
1167ZZ0023	COULEE RIVIERE BLANCHE	0.7	1981	2 m	BSS
1167ZZ0027	FOND CANONVILLE	7.1	1981	2 m	BSS
1167ZZ0028	FOND CANONVILLE	10.3	1981	2 m	BSS
1167ZZ0029	QUARTIER DE LA GALERE / SP1	12.5	2000-2005	1 cm	ADES
1167ZZ0040	QUARTIER LA MONTAGNE / FR3	28.7	2004	2 cm ?	HA
1167ZZ0041	QUARTIER LA MONTAGNE / FR2	28.8	2004	2 cm ?	HA
1167ZZ0043	QUARTIER LA MONTAGNE / FR1	28.9	2004	2 cm ?	HA
FR7	QUARTIER LA MONTAGNE / FR7	29	2004	2 cm ?	HA
1167ZZ0045	CDST	5.1	2006	1 cm	ADES

Illustration 27 : Données piézométriques utilisées pour réaliser la carte piézométrique du secteur de Saint Pierre

Plusieurs remarques sont nécessaires concernant la précision de mesure des différentes cotes.

- Les piézomètres identifiés « ADES » au sein du tableau ci-dessus ont été nivelés par géomètre et font l'objet d'un suivi régulier : la mesure indiquée correspond dans ce cas à la moyenne des mesures piézométriques existantes ;
- Les forages identifiés « BSS », n'ont jamais été nivelés et l'altitude indiquée en archive correspond en général à une lecture faite sur la carte IGN à partir de la localisation du point. De plus, ces forages ne disposent souvent que d'une mesure piézométrique réalisée en général à la suite de la foration. Pour ces points la précision est beaucoup plus faible, du fait de l'addition de ces deux imprécisions, que pour un forage nivelé par un géomètre ;
- Les informations des forages de Pécol proviennent de diverses sources (Bureau d'étude, archives, hydrogéologue agréé) et ont été recoupées les unes avec les autres.

Les interprétations de la carte piézométrique doivent donc prendre en compte les différentes incertitudes générées par ces diverses sources de données. Sur la base de ces données et résultats, une esquisse piézométrique a été tentée à l'échelle du secteur étudié.

Les isopièzes figurées en bleu montrent une orientation des écoulements souterrains grossièrement conforme à la topographie, et avec comme exutoire principal la mer des Caraïbes. Les isopièzes suggèrent aussi qu'une seule nappe continue est présente dans ce secteur, au sein des différentes coulées pyroclastiques (N, NSV, NRS, 1902, 1929, 11B). L'échelle de travail, et surtout le peu de données disponibles, ne permettent néanmoins pas de lier les variations du gradient piézométrique à des passages latéraux de faciès (et de perméabilités).

Globalement le gradient piézométrique est relativement élevé pour une nappe. Il est de l'ordre de 3 à 6 % entre les isopièzes 20 et 30 m NGM. Il semble plus faible dans la partie aval de l'aquifère (entre les isopièzes 0 et 20 m NGM, il est de l'ordre de 2%).

Ces variations de gradient suggèrent que l'aquifère pourrait comporter des zones de bonne perméabilité, caractérisées par des gradients hydrauliques « normaux » (quelques ‰), alternant (en X, Y, et/ou Z) avec des zones de faible perméabilité (par exemple des secteurs où les faciès les plus perméables de l'aquifère sont mal connectés) où les gradients hydrauliques seraient beaucoup plus élevés.

Compte tenu de l'absence a priori de formations peu perméables en bordure des cours d'eau (notamment la Rivière des Pères), on considérera l'existence d'échanges significatifs entre les rivières et la nappe le long de l'ensemble de la partie aval de son cours, dans le sens « rivière pérenne vers nappe » (même s'il n'est pas certain que la rivière soit partout connectée avec la nappe via une zone saturée ; il pourrait aussi exister une zone non saturée sous la rivière).

Afin de valider cette hypothèse (et voir si les rivières alimentent ou non la nappe), il faudrait réaliser de petits piézomètres nivelés (2 à 3 de chaque côté de la rivière) pour mesurer précisément et suivre les niveaux d'eau (et la qualité).

L'esquisse de carte piézométrique résultante de cette hypothèse est figurée sur l'illustration 28 ci-après.

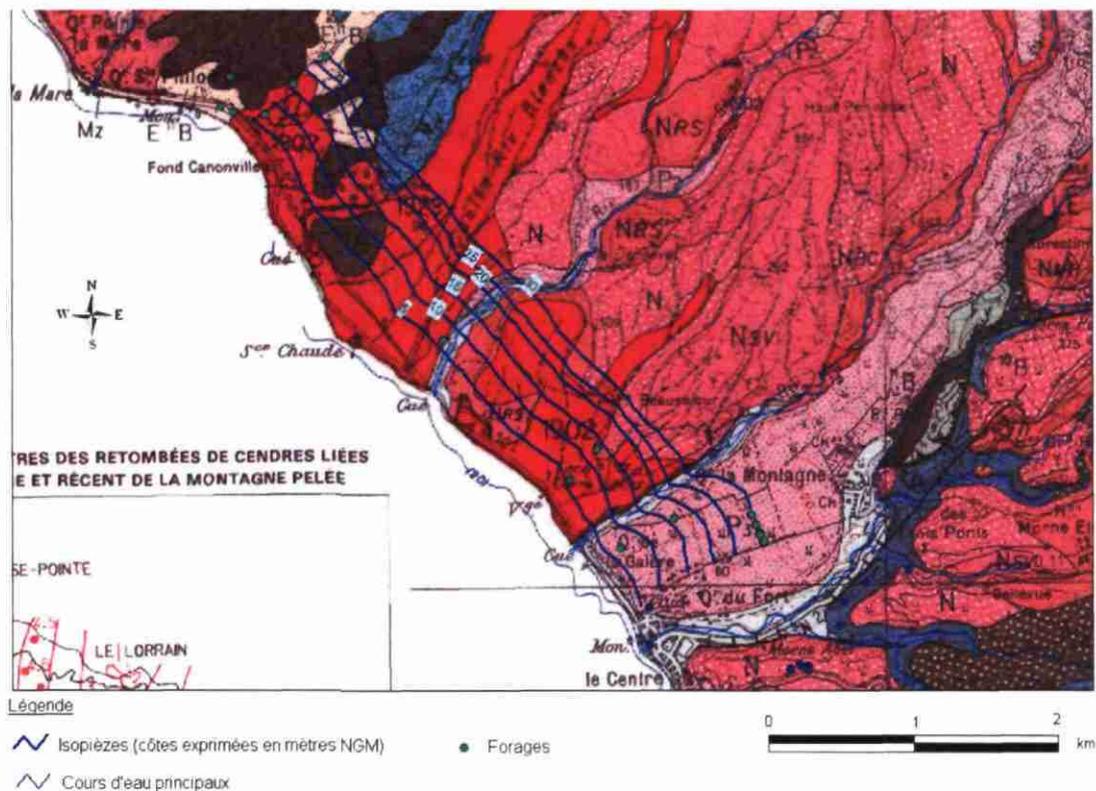
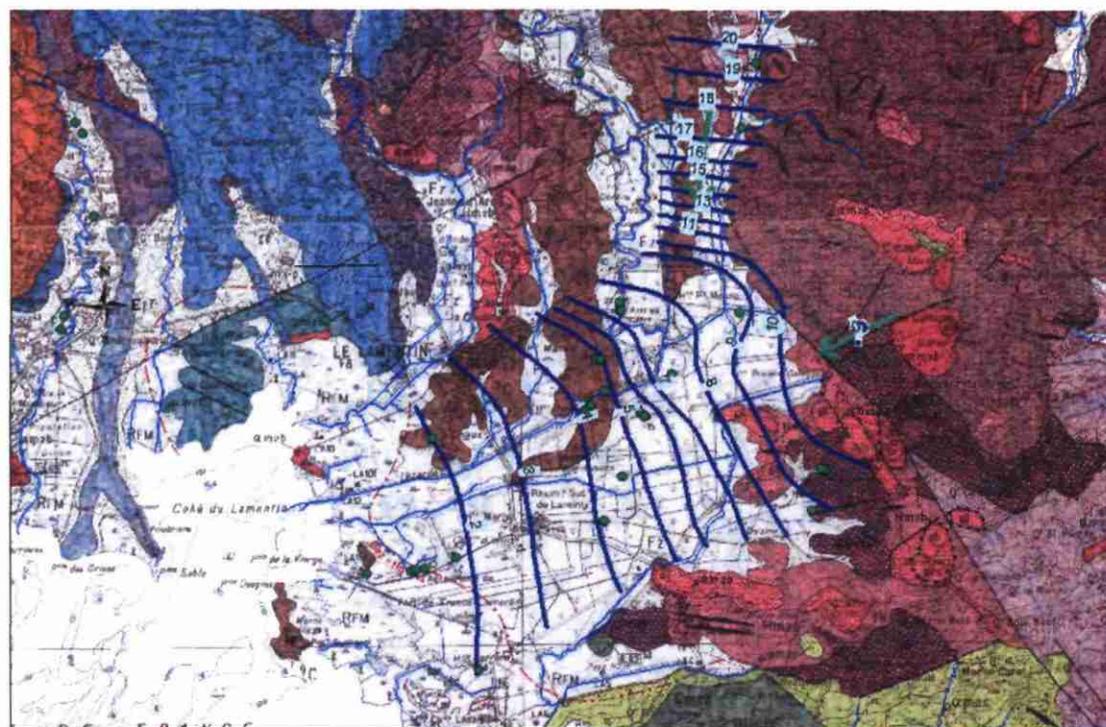


Illustration 28 : Carte piézométrique du secteur de St-Pierre (esquisse 1/50 000)

• **Carte piézométrique du secteur du Lamentin**

Les données exploitées pour l'élaboration de la carte piézométrique de la plaine du Lamentin sont issues du rapport BRGM/RP-55554-FR.

La carte piézométrique est présentée sur l'illustration 29 ci-après.



Légende

— Isopièzes (côtes exprimées en mètres NGM)

● Forages

— Cours d'eau principaux



Illustration 29 : Cartes piézométrique du secteur du Lamentin (1/50 000)

Les écoulements sont globalement N-S au nord de la vallée et prennent une composante NE-SW dans la partie la plus basse de la plaine.

L'allure des isopièzes semble indiquer des flux provenant non seulement du nord, mais aussi des flancs des Mornes Pitault et Pavillon à l'est.

c) Les cours d'eau

En Martinique, les cours d'eau et les eaux souterraines sont hydrauliquement liés. On distingue deux cas de figure :

- **Les cours d'eau drainant les eaux souterraines**

Un cours d'eau drainant correspond à un cours d'eau dont le débit d'étiage est assuré quasi exclusivement par les eaux souterraines. Les rivières pérennes, qui s'écoulent toutes l'année, se classent donc dans cette catégorie. Cette couche du système d'information correspond aux rivières caractérisées par la DIREN comme étant pérennes.

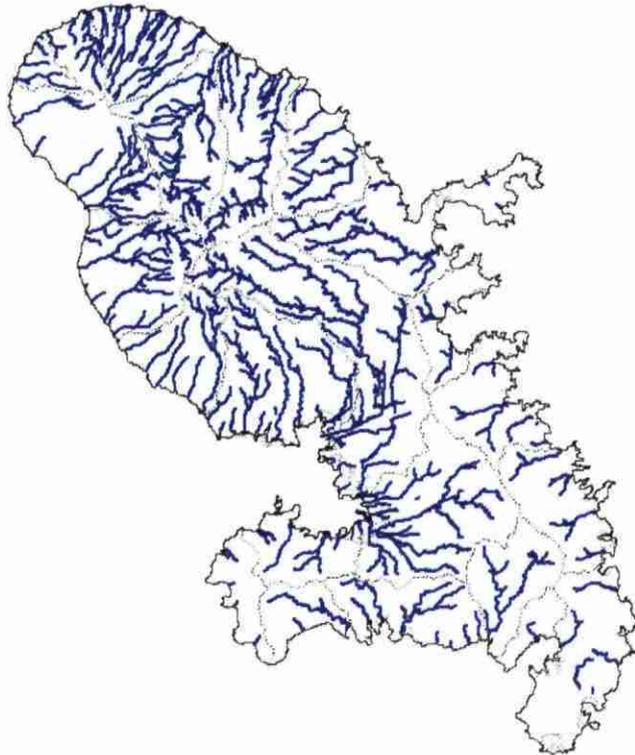


Illustration 30 : Cours d'eau pérennes (Source : DIREN)

- **Les cours d'eau infiltrant (alimentant les eaux souterraines)**

Le débit de base d'un cours d'eau infiltrant, en l'absence de tout apport et prélèvements, diminue d'amont vers l'aval, car l'eau s'infiltré. Les caractéristiques de ces cours d'eau ont été définies plus haut.

d) Zones d'apport direct à la mer

En l'absence de mesures spécifiques de ce paramètre, il a été considéré que tous les aquifères côtiers présentent une certaine composante d'écoulement direct en mer. Une méthodologie a été définie afin d'estimer le pourcentage d'eau s'écoulant directement en mer pour chacune des unités régionales : on se reportera au chapitre 5.4.2.

5. Evaluation quantitative globale des ressources en eau souterraine de la Martinique

5.1. INTRODUCTION

Ce chapitre presente une evaluation des differentes composantes du cycle hydrologique en Martinique (pluie efficace, infiltration, ruissellement) en vue d'estimer, par calculs de differences entre « apports » et « sorties », la ressource potentiellement (càd théoriquement) exploitable en eau souterraine.

La methode adoptee repose sur une modelisation en deux etapes :

- analyse du fonctionnement hydrogéologique des bassins versants instrumentés, à l'aide du logiciel de traitement du signal TEMPO (© BRGM). Il s'agit d'évaluer la contribution des écoulements rapides (ruissellement) et lents (vidange de nappe) aux débits des cours d'eau et d'estimer les temps de transit moyens dans chaque compartiment (sol et sous-sol).
- modelisation globale du cycle de l'eau à l'échelle des Unités Régionales telles que définies en 4.4.2.b, selon l'approche des réservoirs en cascade (modèle développé spécifiquement à l'aide des logiciels Matlab et Simulink).

5.2. CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE DE LA MARTINIQUE

5.2.1. Pluviométrie

a) Généralités

Le climat des Antilles est défini par les effets, dans l'atlantique est, de l'anticyclone des Açores au nord qui vient buter contre une zone de dépression située au sud : la zone intertropicale de convergence (ZIC). Ce caractère fondamental détermine toute l'année un courant de masses d'air d'est en ouest : les vents alizés.

b) Variations temporelles des pluies

Les variations journalières des précipitations sont principalement dues au phénomène convectif alors que les variations annuelles sont causées par le caractère plus régional du climat (saison sèche et saison des pluies). Les variations interannuelles sont très importantes, occasionnées par les perturbations dans les cycles des saisons.

On distingue deux saisons principales : la saison des pluies ou hivernage et la saison sèche ou carême.

Des valeurs de moyennes mensuelles de pluviométrie sont décrites en Annexe 1

et dans l'illustration 31. Le carême s'étend sur 5 mois environ, de janvier à mai, grâce à un régime d'alizés avec des vents réguliers assez forts qui entraînent une diminution de la pluviosité (Illustration 31). Le minimum de précipitations se situe entre février et avril. L'Hivernage dure 6 à 7 mois avec des passages de perturbations tropicales ou des remontées de la ZIC donnant des pluies abondantes et fréquentes qui pourront tomber de juillet à novembre avec un maximum entre septembre et novembre (300 mm environ).

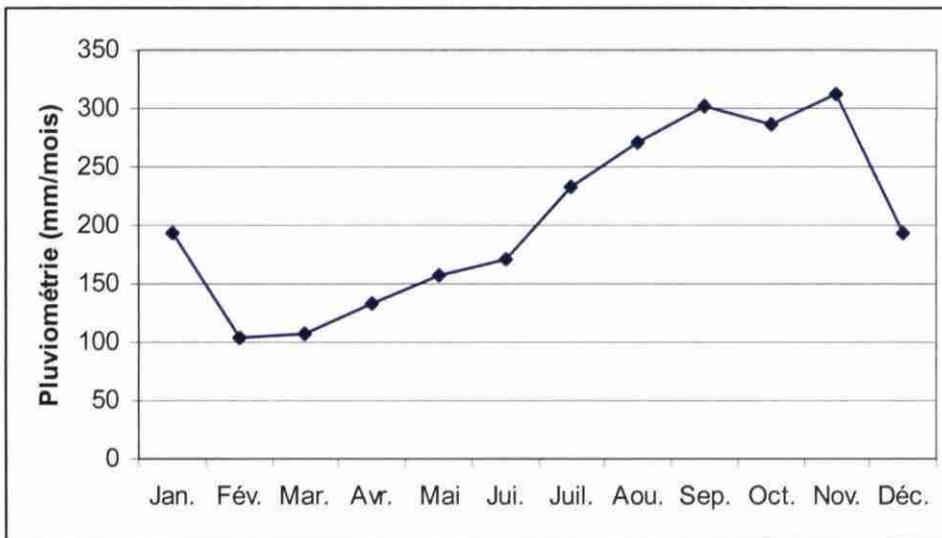


Illustration 31 : Moyennes mensuelles de pluviométrie (stations indiquées en annexe 1)

A long terme (depuis 1951), on ne constate pas d'évolution clairement identifiée de la pluviométrie en Martinique. On a relevé toutefois un déficit de pluie sur des années successives entre 1999 et 2003, mais la pluviométrie en 2004 a été fortement supérieure à la moyenne. Dès lors, il est hasardeux de parler de sécheresse récurrente. Une étude concernant la corrélation entre la pluviométrie annuelle ou saisonnière et El Nino est en cours (Météo-France, *Com. Pers.*).

c) Variations spatiale des pluies

Le relief détermine en grande partie les variations spatiales de la pluie (voir Illustration 32). Deux faits très nets se dégagent de cette répartition : la dissymétrie classique entre l'Est « au vent » et l'Ouest « sous le vent » et la dissymétrie originale entre le Nord très pluvieux et le Sud bien moins arrosé en accord avec les différences d'altitude des deux régions (Guiscafre et al, 1976).

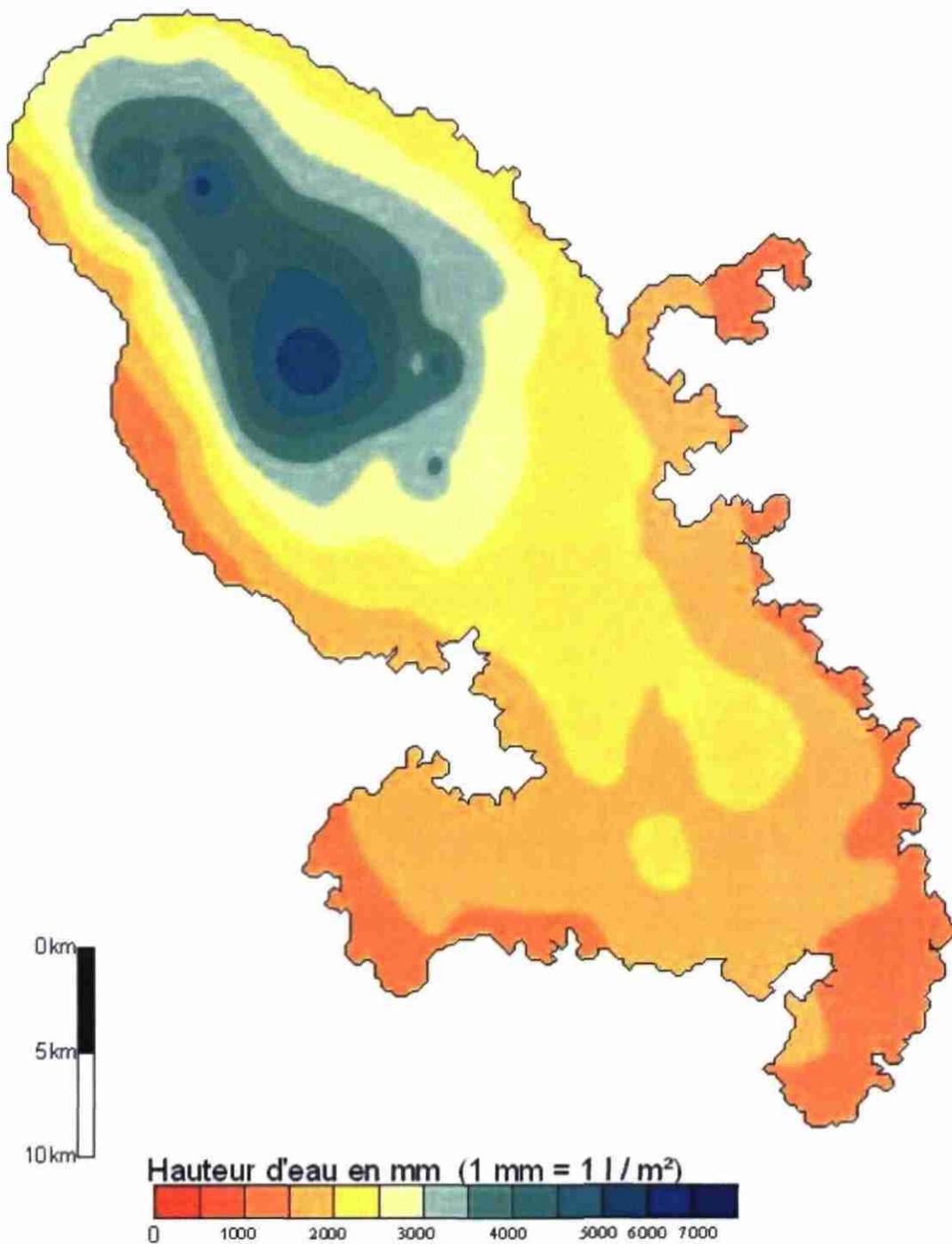


Illustration 32 : Pluviométrie moyenne annuelle en Martinique (1915-2006) en mm/an
(source : MétéoFrance, juin 2006)

La dissymétrie entre versants Ouest (sous le vent) et Est (au vent) apparaît très nettement sur les données des stations météorologiques (Illustration 33 et Illustration 34). La pluviométrie moyenne annuelle enregistrée varie d'environ 1 000mm (Caravelle) à près de 5 300mm (Fonds St Denis). Elle est systématiquement supérieure sur la côte au vent (est) par rapport à la côte sous le vent (ouest), et au nord par rapport au sud.

Station	Altitude (m)	Moyenne (mm/an)	Versant
BASSE POINTE	50	2 263	E
LORRAIN usine	25	2 317	E
STE MARIE usine	8	2 128	E
MARIGOT Fourniol	270	3 511	E
FOND SAINT DENIS Deux Choux	605	5 280	E
TRINITE Galion (Hab.)	45	2 341	E
FORT DE FRANCE Alma	465	4 662	E
ROBERT usine	10	1 743	E
FRANÇOIS usine	10	1 791	E
LAMENTIN Acajou	102	2 202	E
AJOUPA BOUILLON	260	3 505	E
AJOUPA B. Eden	320	3 725	E
AJOUPA B. Aileron		3 726	E
BASSE POINTE Chalvet	45	2 297	E
GRAND RIVIERE Beauséjour	100	2 792	E
MACOUBA Bellevue	190	2 899	E
ROBERT Duchesne	230	1 954	E
SAINTE MARIE Bellevue	165	2 681	E
SAINTE MARIE Concorde	42	2 813	E
SAINTE MARIE Esses	224	2 981	E
TRINITE Caravelle	33	1 049	E
SAINT JOSEPH Lézarde	49	2 361	limite
FOND SAINT DENIS Morne des Cadets	510	2 942	O
SAINT JOSEPH Rabuchon	430	3 194	O
FORT de FRANCE Balata La Donis	510	3 685	O
CASE PILOTE Choiseul	116	1 379	O
FORT de FRANCE Desaix	144	1 941	O
FORT de FRANCE Didier	205	2 766	O
FONDS st DENIS Cadets	510	2 995	O
FONDS st DENIS Glissement	300	4 474	O
MORNE ROUGE Champflore	471	4 673	O
MORNE ROUGE Gendarmerie	445	4 303	O
SAINT PIERRE Périnelle	150	1 915	O

PETIT BOURG usine	4	1 690	S
TROIS ILETS poterie	3	1 587	S
DIAMANT Jacques	50	1 577	S
DIAMANT Pavillon	377	1 246	S
FRANCOIS Chopotte	60	3 246	S
LAMENTIN Aéroport	3	2 032	S
LAMENTIN Petit morne	15	2 029	S
SAINT ESPRIT Baldara	285	1 631	S
SAINTE ANNE SECI	10	1 456	S
TROIS ILETS La Pagerie		1 618	S
TROIS ILETS PTT	35	1 824	S
VAUCLIN Puyferrat	75	1 621	S
VAUCLIN Paquemar	105	1 339	S

Illustration 33 : Pluviométrie moyenne annuelle sur plusieurs stations de Martinique (E : versant Est, O : versant Ouest, S : Sud de l'île)

Source : Reguieg (1986) et Météo-France

L'évolution de la pluviométrie avec l'altitude sur la côte « au vent » est assez linéaire (Illustration 34). L'ajustement linéaire permet de déterminer la pluviométrie P en fonction de l'altitude en un point z :

$$\text{Côte au vent : } P = 1880 + 5,26 z$$

Sous le vent, l'ajustement linéaire est beaucoup moins évident, contrairement à la Guadeloupe par exemple. En comparant avec les données sous le vent de Guadeloupe, on constate qu'une régression linéaire totale pourrait être relativement satisfaisante, donnant (avec une qualité de régression moindre) :

$$\text{Côte sous le vent : } P = 1460 + 3,98 z$$

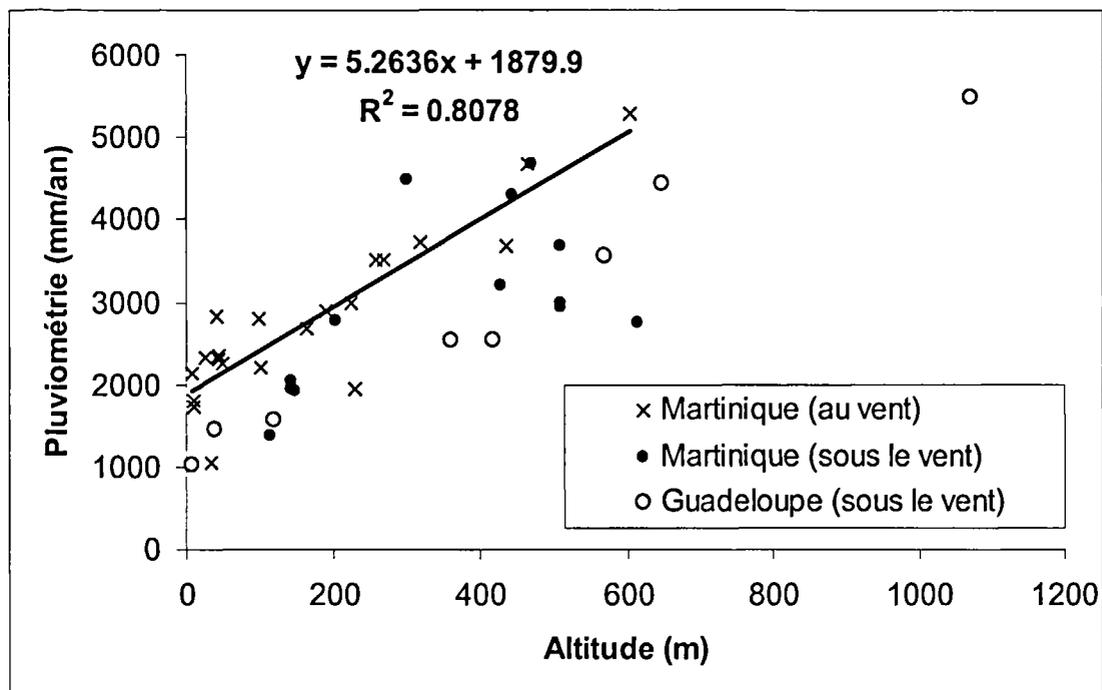


Illustration 34 : Pluviométrie mesurées aux stations de Martinique en fonction de leur altitude. Comparaison avec la côte sous le vent de la Guadeloupe

Une étude récente de la répartition géographique des précipitations (Mobèche, IRD, 2003) a conduit à découper la Martinique en 14 zones pluviométriques considérées comme étant homogènes sur la base des critères suivants : pluviométrie annuelle, nombre de jours de pluie et relief. Ces zones sont localisées sur l'illustration 35.

Les zones pluviométriquement homogènes (ZPH) et les gradients pluviométriques sont des outils pertinents pour rendre compte de la variabilité spatiale de la pluviométrie en Martinique dans le cadre d'une modélisation hydrologique.

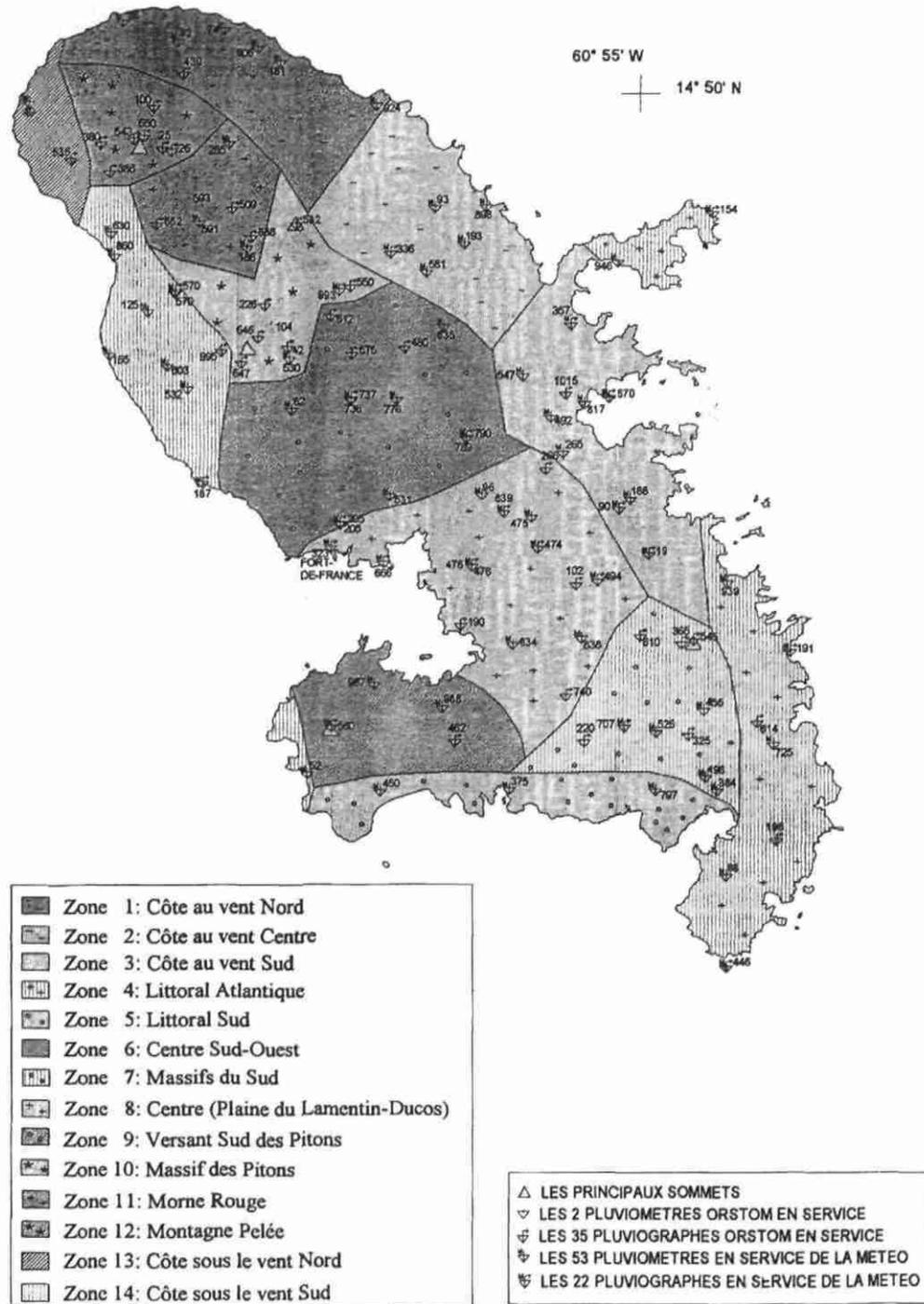


Illustration 35 : Découpage de la Martinique en 14 Zones Pluviométriquement Homogènes
Source : Mobèche, IRD (2003)

5.2.2. Evapotranspiration

Températures

La température est l'un des facteurs principaux du pouvoir évaporant de l'atmosphère.

Les températures en zone intertropicale ont des moyennes annuelles fortes (entre 23 et 27 °C) et des amplitudes inter mensuelles très faibles ($\approx 3,6$ °C). Par contre, l'amplitude quotidienne moyenne est largement supérieure à l'amplitude annuelle. Les températures les plus fortes sont observées en août (Hivernage) et les plus basses en février (Carême).

Evapotranspiration potentielle (ETP)

Cinq formules empiriques de calcul de l'ETP ont été testées en Martinique (Reguieg, 1986). Les trois formules de calcul de Penman, Brochet-Gerbier et Bouchet donnent un même ordre de grandeur. En revanche, les écarts importants entre les résultats de ces trois formules et ceux obtenus avec les formules de Thornthwaite et Turc montrent que ces dernières ne sont pas adaptées au climat de la Martinique.

Des calculs statistiques d'ETP ont été effectués entre 1971 et 1985 pour divers postes climatologiques du réseau. A titre d'exemple, l'ETP mensuelle calculée (formule de Penman) à la station de l'aéroport du Lamentin est présentée sur l'illustration 36.

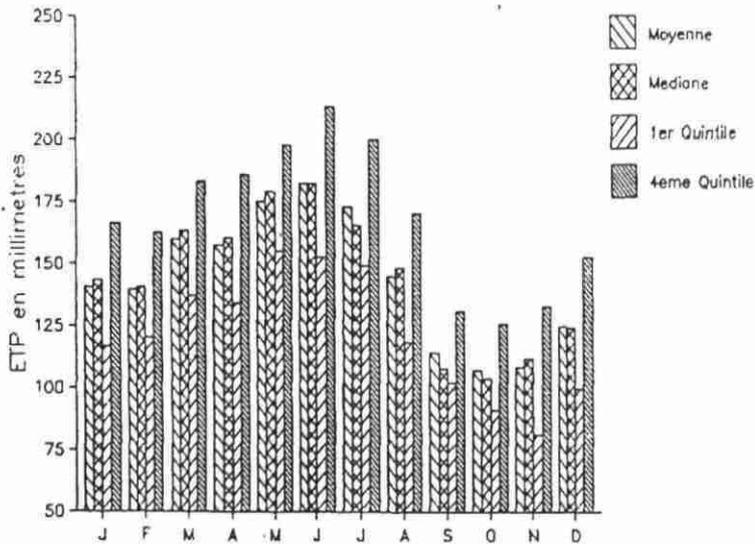


Illustration 36 : ETP mensuelles calculées à la station de l'aéroport du Lamentin (période 1971-1985)

Comme pour la pluie, cette répartition saisonnière se double d'une répartition zonale (Illustration 37) mise en évidence par les cartes d'ETP cumulées annuelle.

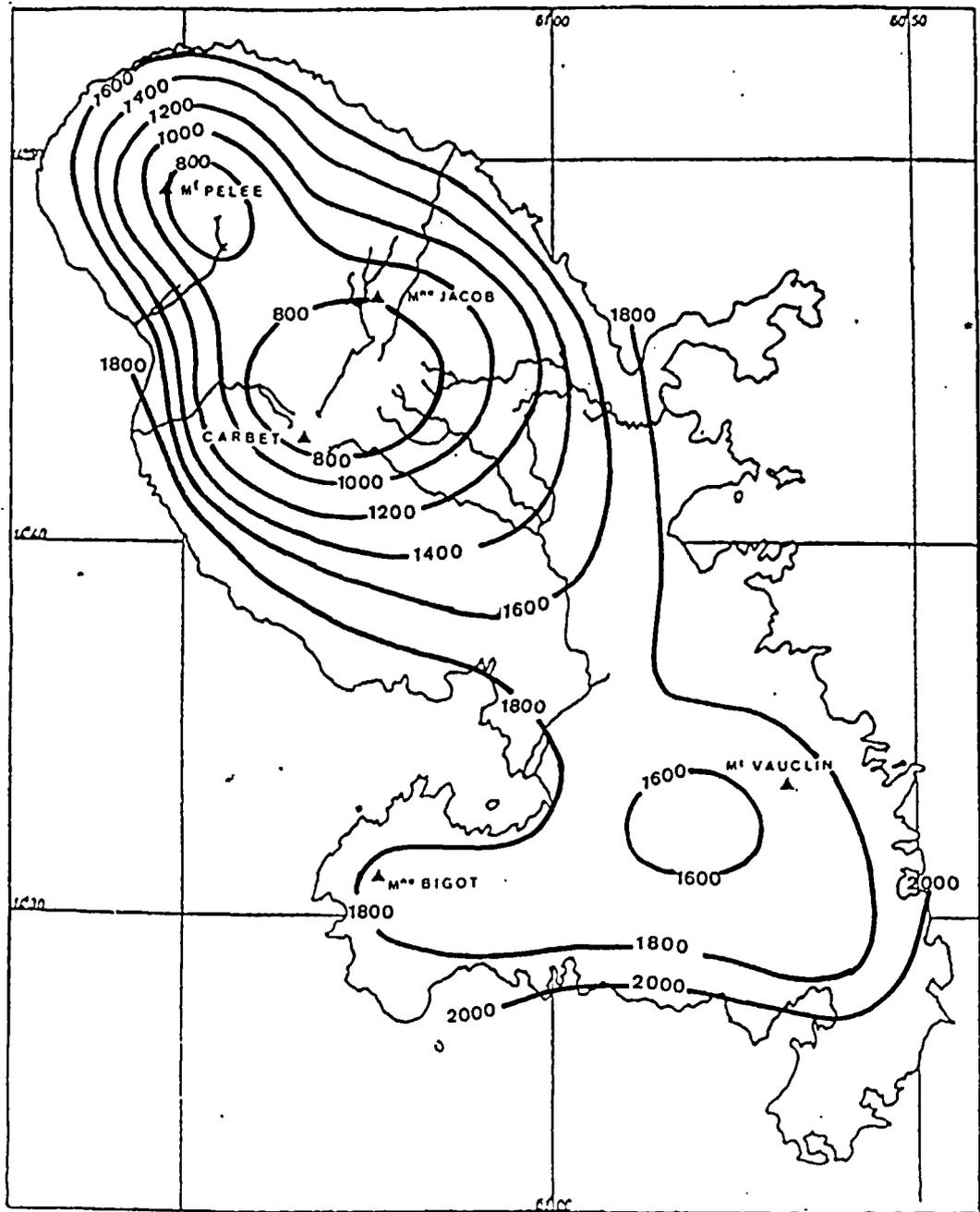


Illustration 37 : Evapotranspiration moyenne annuelle en Martinique entre 1961 et 1980 en mm/an
Source : Reguieg (1986)

Dans les régions où les précipitations sont excédentaires, les ETP sont faibles. Inversement, les régions à faible pluviométrie voient ce déficit pluviométrique aggravé par des ETP plus fortes.

Étant donné la diminution de la température avec l'altitude et la diminution d'insolation liée à une plus forte nébulosité, l'évapotranspiration potentielle tend en effet à décroître avec l'altitude. En Martinique, l'évaporation Piche est en moyenne de 1100 à 1200 mm/an à faible altitude et décroît avec l'altitude (Guiscafre et al., 1976).

La carte d'iso-ETP (Illustration 37) illustre l'effet du relief sur ce paramètre ainsi que les différences entre le Nord et le Sud de l'île. En reportant cette carte sur une carte topographique, il est possible de déterminer en première approche les valeurs d'ETP à différentes altitudes (Illustration 38). Elles sont comparées à celles déterminées à la Réunion où un gradient altimétrique égal à $-0,0018$ mm/j/m (soit $-67,3$ mm/an/100 m) a été mis en évidence (Enilorac, 1986). L'étude démontre également que la diminution d'ETP est plus forte en période chaude qu'en période fraîche (Carême).

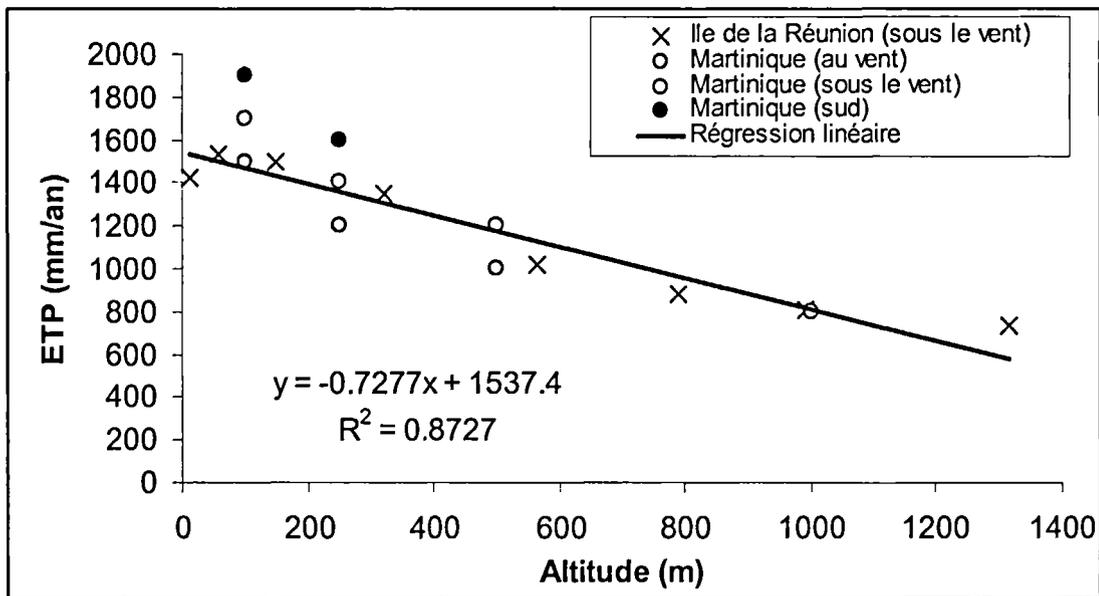


Illustration 38 : Évolution de l'ETP en fonction de l'altitude en Martinique et à la Réunion

Les valeurs du Sud de l'île sont, à même altitude, globalement plus élevées suite aux plus fortes températures et au plus fort ensoleillement. Au Nord de l'île, sur les reliefs, l'évapotranspiration potentielle décroît selon un gradient altimétrique moyen (moyenne sur Martinique et Réunion) de 73 mm / 100 m.

5.2.3. Bilan hydrologique

a) Déficit d'écoulement

Le déficit d'écoulement d'un bassin versant (D) est défini comme la différence entre la pluviométrie (P) et l'écoulement à son exutoire (Q) : $D = P - Q$. Il a été estimé pour quelques bassins de Martinique par Guiscafre et al. (1976) (voir Tableau 1).

Bassin	Altitude (m)	P (mm/an)	Q (mm/an)	D (mm/an)
Rivière Monsieur	400	3500	2300	1200
Lezarde au Soudon	310	-	-	1240
Rivière Blanche à Alma	725	5772	4452	< 1320

Tableau 1 : Estimation du déficit d'écoulement de trois rivières de Martinique

Les auteurs en concluent que les valeurs permettent de retenir pour le déficit annuel d'écoulement un éventail de 1000 à 1200 mm selon les bassins et les années dans la majeure partie de la moitié nord de l'île (où se situent les bassins à pluviométrie moyenne supérieure à 2500 mm/an). Dans la zone côtière et dans tout le Sud de l'île l'évapotranspiration potentielle croît fortement, mais le déficit d'écoulement ne devrait guère augmenter (1000 à 1300 mm/an) par suite de la diminution de la pluviosité.

b) Evapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle (ETR) dépend des paramètres climatiques tels que la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle, mais aussi de leur distribution dans le temps et des caractéristiques des sols, au travers de la RFU (réserve facilement utilisable) des sols. La détermination de l'ETR nécessite le calcul d'un bilan hydrique des sols à un pas de temps mensuel, voire journalier (voir §1.1.1.c).

Dans le contexte hydrologique martiniquais, l'évapotranspiration réelle est en général très proche du déficit d'écoulement, en l'absence d'importants échanges inter - bassins d'eau souterraine. Dès lors, pour la partie Nord de l'île, l'ETR varie probablement entre 1000 et 1200 mm/an.

c) Bilans

Les termes du bilan hydrologique sont dépendants des disponibilités relatives en eau (précipitations P) et en énergie (évapotranspiration potentielle ETP). Celles-ci influencent la redistribution de l'eau (débits Q, évapotranspiration réelle ETR) au sein du bassin versant.

Or, il a été constaté précédemment que les précipitations et l'évapotranspiration potentielle varient en fonction de l'altitude. Il est donc intéressant d'observer l'évolution des termes du bilan hydrologique annuel en fonction de l'altitude moyenne des bassins versants.

Cette évolution des termes du bilan en fonction de l'altitude est représentée sur l'illustration 39. À des altitudes faibles, dans les régions proches de la côte, la pluie efficace ($P_{\text{eff}} = \text{Pluie diminuée de l'ETR}$, c'est-à-dire eau disponible pour le ruissellement, l'infiltration et le sol) est quasi nulle. Cela veut donc dire qu'il y a peu d'eau disponible, après évapotranspiration, pour le ruissellement de surface et l'infiltration vers les nappes aquifères. Ceci est dû à la forte valeur de l'évapotranspiration potentielle par rapport aux précipitations au niveau de la mer. Lorsque l'altitude croît, l'augmentation des précipitations induit une augmentation des précipitations efficaces, jusqu'à des valeurs proches de 4000 à 5000 mm/an au-delà de 1000 m d'altitude.

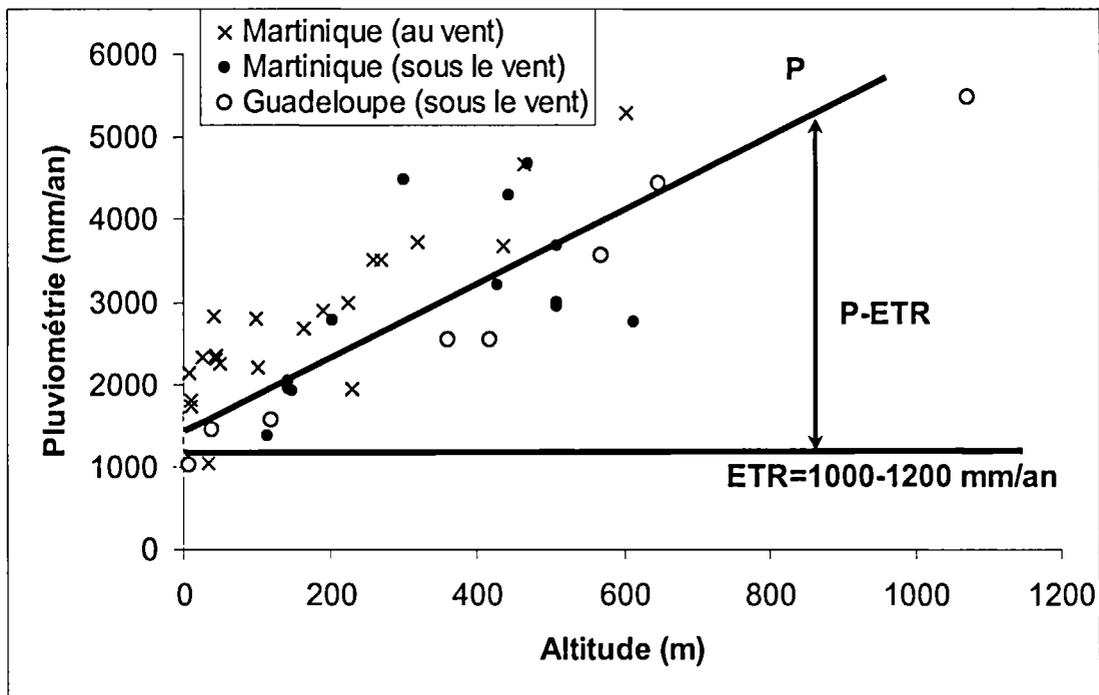


Illustration 39 : Évolution des précipitations et de l'évapotranspiration réelle (ETR) en fonction de l'altitude

Cette situation est tout à fait comparable à celle observée en Guadeloupe ou à la Réunion.

5.3. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS PAR L'APPROCHE DE MODELISATION PLUIE-DEBIT (TEMPO)

Les objectifs de l'analyse du fonctionnement hydrogéologique des bassins versants par l'approche globale de modélisation Pluie-Débit « Tempo » sont les suivants :

- évaluation de la contribution relative des eaux souterraines et du ruissellement de surface à l'écoulement des rivières pour différents secteurs hydrographiques de la Martinique ;
- caractérisation des réponses impulsionnelles (hydrogramme unitaire) des composantes de l'écoulement des eaux de surface.

Les résultats de la modélisation permettront de renseigner la base de données des unités régionales (moyenne et variabilité de la part renouvelable de l'alimentation des nappes). Ils seront également utilisés pour caler le modèle global (cf. chapitre 5).

Le logiciel utilisé est le logiciel TEMPO développé par le BRGM (Pinault, 2001 - 2006).

5.3.1. Principe général de l'approche de modélisation Tempo

Le type d'approche utilisée apporte, à partir du suivi en continu d'un niveau piézométrique ou d'un débit et de paramètres physico-chimiques tels que la conductivité et la température de l'eau, des renseignements sur les processus de transfert responsables des variations observées et, ce faisant, sur les mécanismes régissant le fonctionnement d'un hydrosystème.

Le traitement numérique des chroniques fait appel à des techniques d'inversion. On parle alors de modélisation inverse des phénomènes. Contrairement à la modélisation directe qui consiste à simuler le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de concepts reposant à la fois sur la description de l'hydrosystème et l'application de lois de la physique, la modélisation inverse décrit le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de réponses impulsionnelles (ruissellement, écoulement souterrain, transfert de masse). Ces réponses impulsionnelles (appelées également fonctions de transfert ou hydrogramme unitaire) sont estimées à partir de séries chronologiques : pluie, débit, niveau piézométrique, concentration de divers solutés, propriétés physico-chimiques du milieu.

5.3.2. Application à la Martinique

Dans le cas de la Martinique, les débits ont été modélisés à l'aide de deux réponses impulsionnelles distinctes : une réponse impulsionnelle rapide qui est décrite comme le ruissellement de surface, et une réponse impulsionnelle lente correspondant à la contribution des aquifères au débit des cours d'eau étudiés.

Le choix du type de ces réponses impulsionnelles revient au modélisateur. Elles peuvent être de type paramétrique (fonction mathématique connue, fonction exponentielle par exemple) ou non paramétrique. Dans ce dernier cas, c'est le logiciel TEMPO qui détermine la fonction mathématique appropriée qui permet de décrire au mieux la variable de sortie à modéliser. L'étude du fonctionnement des différents bassins versant de la Martinique a été réalisée à l'aide de l'option « non paramétrique », l'utilisation des modèles paramétriques ne permettant pas de reproduire de manière satisfaisante l'évolution des débits mesurés.

L'approche employée est basée sur l'étude comparée des signaux d'entrée (pluie, ETP) et des signaux de sortie (débit) par établissement de fonctions de transfert calées sur de longues séries d'observations. Il est en effet nécessaire de disposer de séries de mesures (pluviométrie et débits validés) au pas de temps journalier concomitantes de plusieurs années recouvrant des périodes sèches et humides. Les interruptions de mesures sont préjudiciables et ne peuvent être compensées lorsqu'il s'agit de signaux d'entrée.

La première étape de la modélisation pluie-débit a donc consisté en une analyse des données existantes et exploitables :

- acquisition et préparation des données sur 26 stations pluviométriques, équivalent à 326 années de données ;
- acquisition et préparation des données sur 13 stations hydrométriques. Ces stations contrôlent 10 bassins versants, avec une superficie totale représentant environ 20% de la Martinique (Illustration 40) ;
- acquisition de l'ETP sur 31 ans à la station du Lamentin.

Pour chaque bassin versant étudié, il a été nécessaire de déterminer « la chronique de pluie représentative » du fonctionnement du système. Cette étude préalable a été menée à l'aide de l'option « pondération des chroniques de pluie » du logiciel TEMPO qui équivaut à établir le corrélogramme croisé « pluie-débit » à partir de la combinaison linéaire optimisée des chroniques de pluie disponibles.

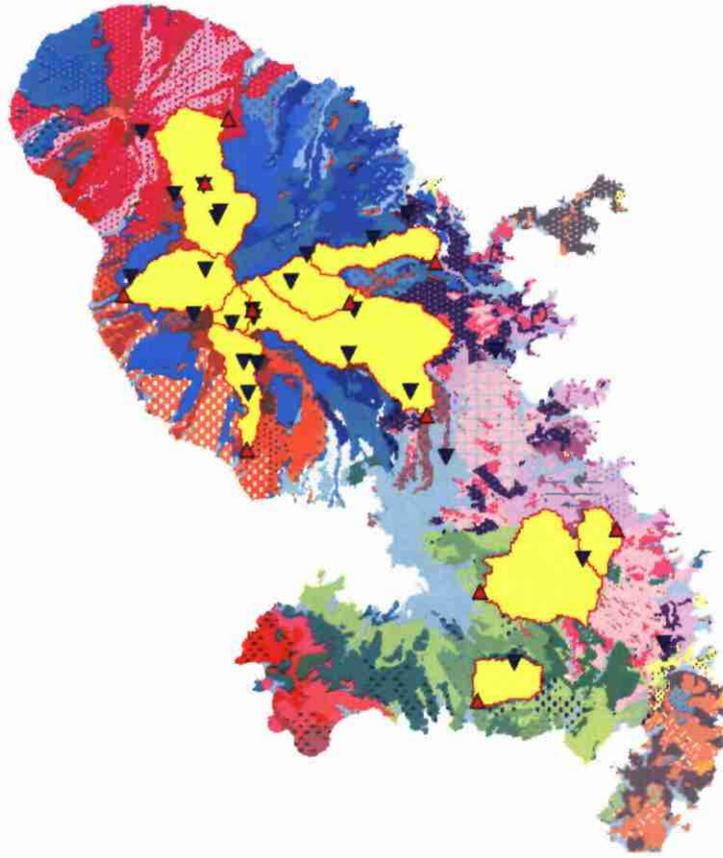


Illustration 40 : Localisation des bassins versants (en jaune), des stations hydrométriques (en rouge) et des stations pluviométriques (en bleu).

5.3.3. Exemple de résultats obtenus : bassins versants de la Capot amont et de Fond Rousseau

La technique d'inversion par l'approche de modélisation TEMPO consiste à calculer les hydrogrammes unitaires (Illustration 42) et le seuil Oméga de pluie efficace (Illustration 43) de telle sorte que le débit simulé par le modèle soit le plus proche possible du débit observé (Illustration 44). Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et de l'ETP (variable climatique) de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. Il est calculé à partir de la réponse impulsionnelle du système à la pluie et à l'ETP (Illustration 45), également obtenues par inversion. Le schéma de principe de cette approche est présenté sur l'illustration 48.

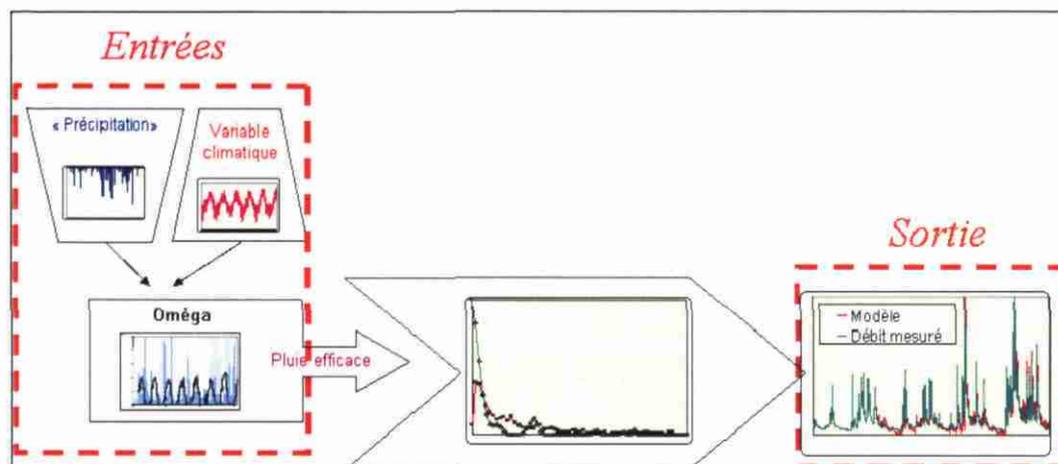


Illustration 41 : Schéma de principe de la modélisation mis en oeuvre à l'aide du logiciel TEMPO

Sont présentés ci-après de manière détaillée les résultats obtenus sur les bassins de la Capot (amont) et Fond Rousseau qui permettent d'illustrer les différents comportements hydrogéologiques rencontrés à l'échelle de la Martinique.

Les résultats des modélisations sont présentés sur l'illustration 44. Le modèle permet de simuler assez fidèlement les évolutions observées : les pics de crues et le tarissement sont globalement bien reproduits. Le modèle permet d'expliquer respectivement 83 % et 78 % de la variance totale des débits observés pour le bassin versant du Capot-amont et celui de Fond Rousseau, ce qui constitue un bon résultat (critère de Nash proche de 0.67).

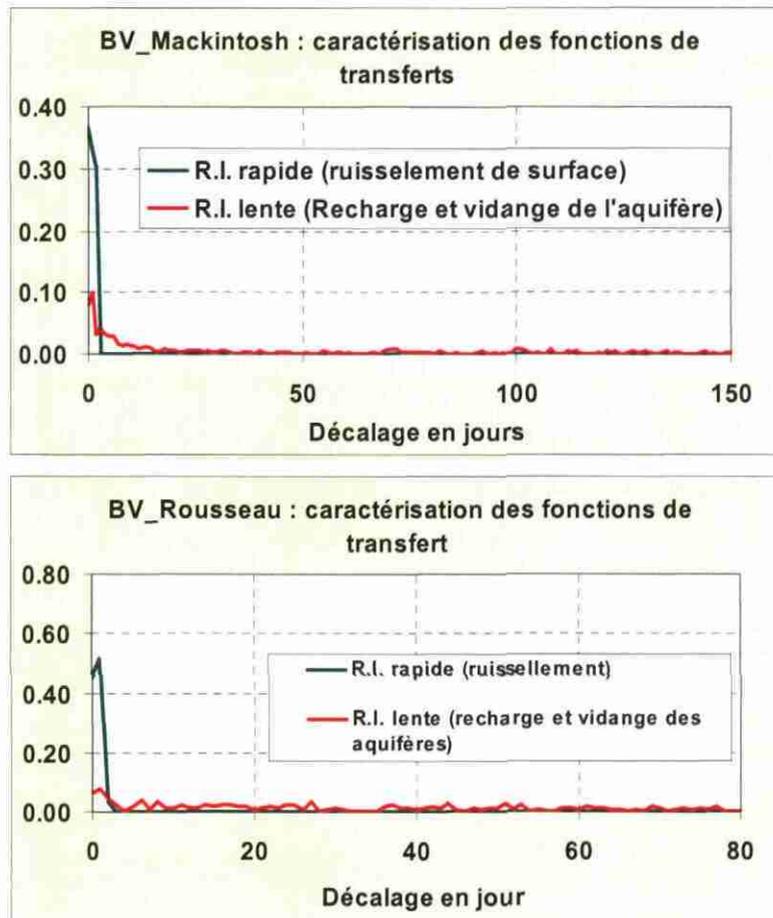


Illustration 42 : Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du ruissellement et de la recharge des aquiferes (bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau)

La réponse impulsionnelle de la recharge par la pluie efficace (Illustration 42) montre un maximum prononcé 1 jour après l'épisode de pluie, puis décroît progressivement jusqu'à ce que le décalage atteigne 40 jours environ pour le BV Capot amont (station Mackintosh) et moins de 10 jours pour le BV Fond Rousseau. A partir de ce décalage, la recharge par la pluie efficace devient négligeable voire nulle et les systèmes se vidangent alors très lentement. Le temps de transit moyen de la recharge et de la vidange (barycentre de la réponse impulsionnelle) est de l'ordre de 20 jours pour le BV Fond Rousseau et de l'ordre de 83 jours pour le BV Capot amont. La réponse impulsionnelle du ruissellement présente également un maximum au bout d'un jour et décroît très rapidement jusqu'à ce que le décalage atteigne 2 -3 jours environ. Le temps de transit moyen du ruissellement de surface (barycentre de la réponse impulsionnelle) est très faible de l'ordre de 0.9 jour pour le BV Capot amont et de l'ordre de 0.6 j pour le BV Rousseau.

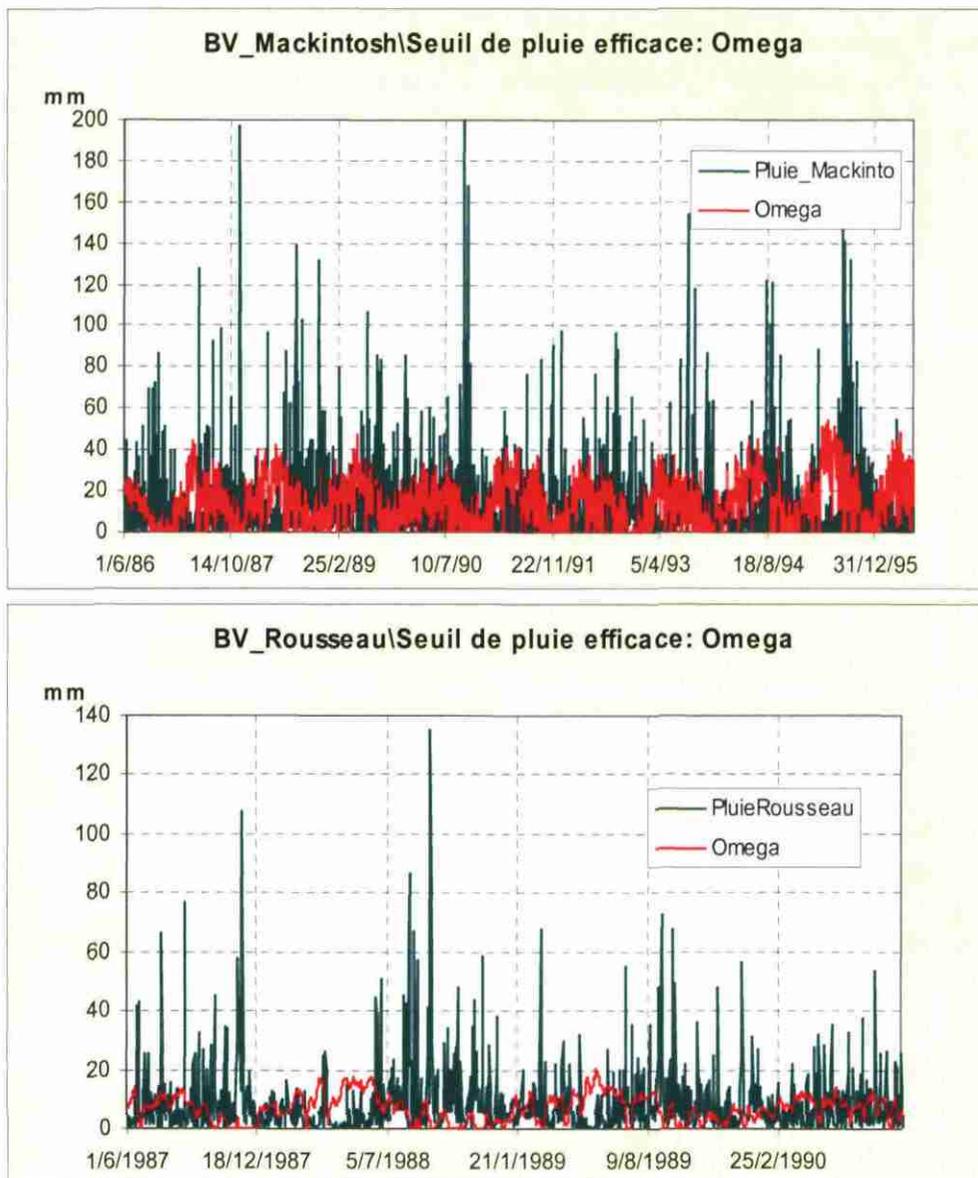


Illustration 43 : Evolution temporelle du seuil de pluie efficace (bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau)

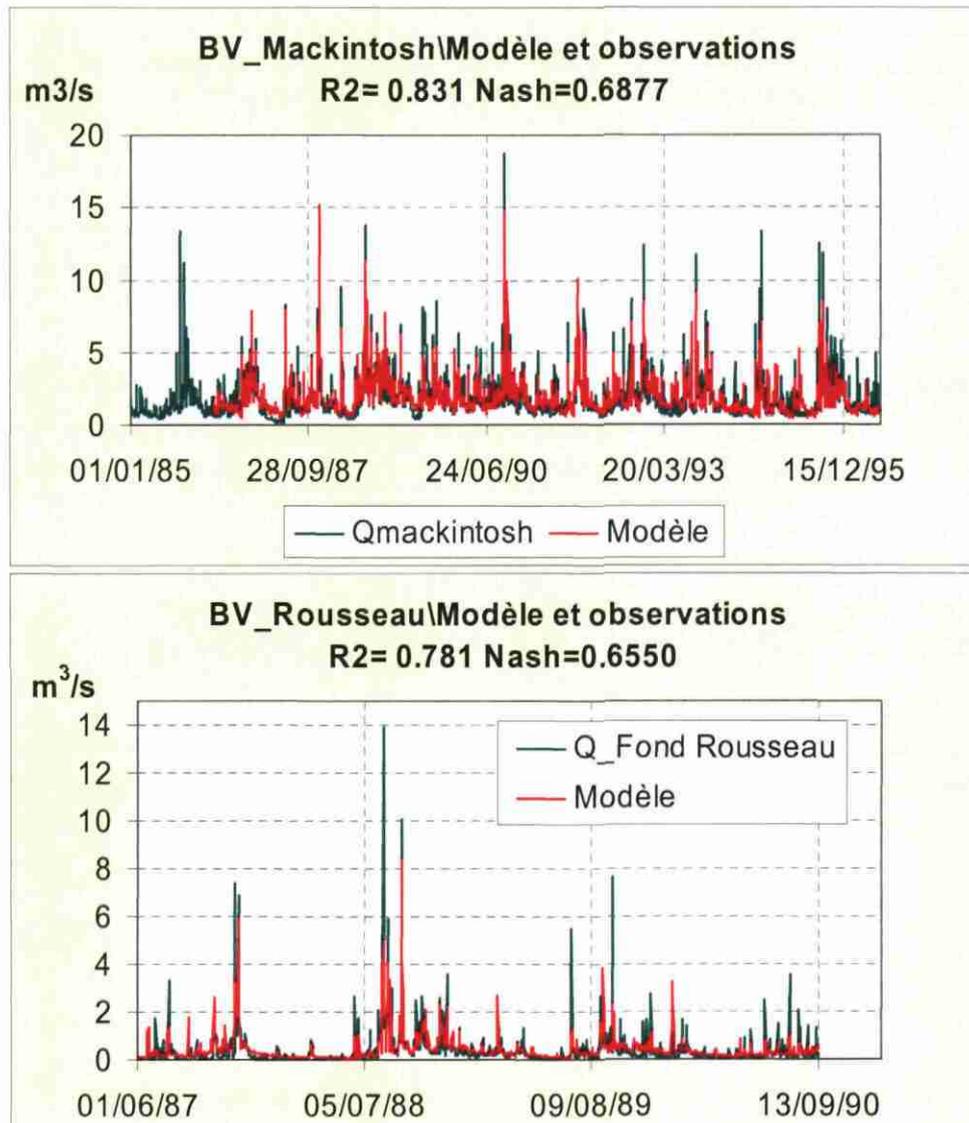


Illustration 44 : Comparaison du débit modélisé au débit mesuré (bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau)

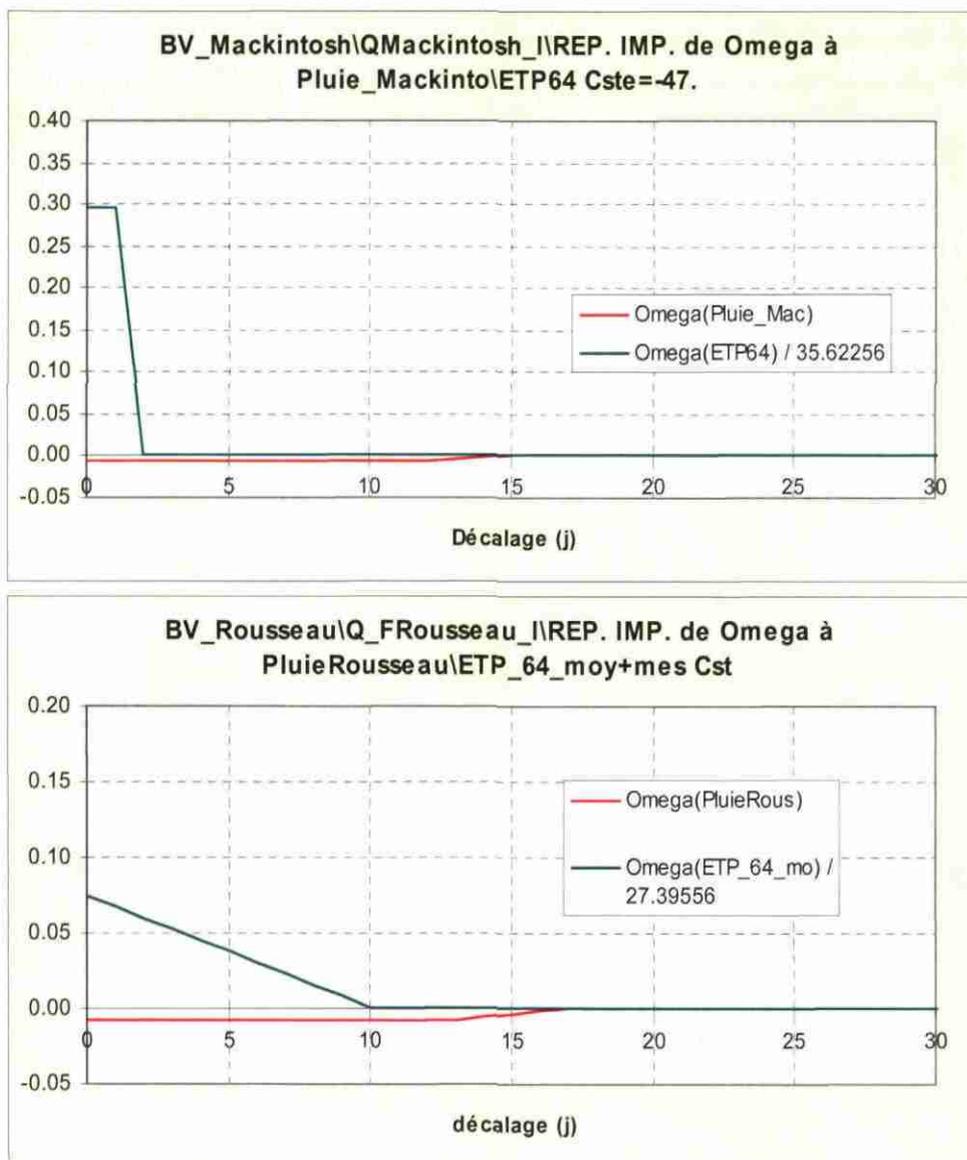


Illustration 45 : Réponse impulsionnelle d'Oméga à la pluie et à l'ETP (bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau)

Les hydrogrammes modélisés ont été décomposés en deux composantes : (1) ruissellement de surface et (2) recharge par les précipitations et vidange de la zone noyée (Illustration 46). Sur l'ensemble des périodes de calcul (respectivement 9 ans et 3 ans pour les bassins versants Capot et Rousseau), les contributions moyennes des deux composantes de l'écoulement des cours d'eau ont été évaluées :

- pour le bassin versant Capot amont la contribution moyenne du ruissellement de surface au débit de la rivière est faible (comprise entre 10 et 20%), le complément (de 80 à 90%) étant assuré par la composante souterraine.
- Pour le bassin versant Fond Rousseau la part du ruissellement de surface au débit de la rivière est importante, comprise entre 30 et 50%, la part complémentaire assurée par la composante souterraine étant comprise entre 70% et 50%.

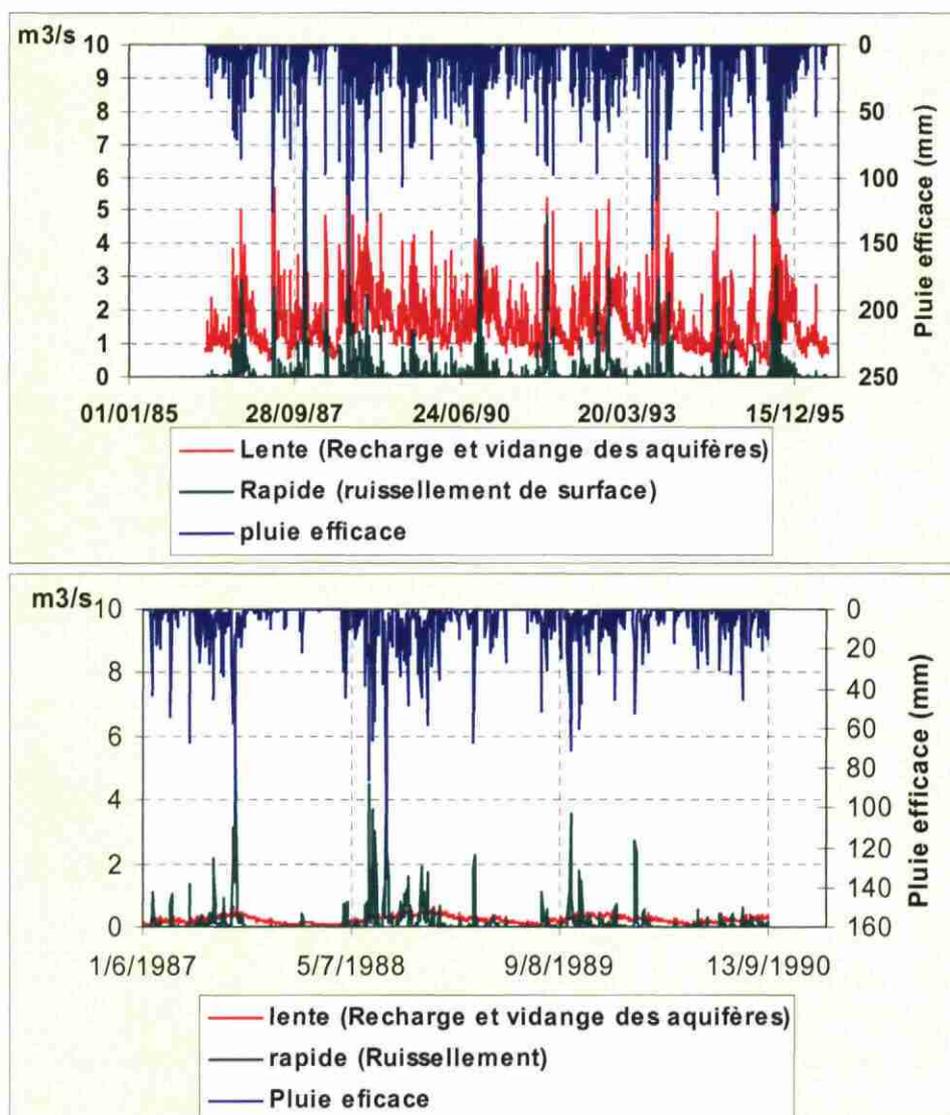


Illustration 46 : Evolution temporelle du ruissellement de surface et du débit issu de la composante souterraine (recharge et vidange de la zone noyée) ; Résultats des bassins versants de la Capot-amont et de Fond Rousseau

5.3.4. Synthèse des résultats obtenus par l'approche de modélisation Tempo

Sur la base des propriétés des réponses impulsionnelles de la composante souterraine (recharge et vidange de la zone noyée) d'une part, et du pourcentage de contribution des composantes de l'écoulement des cours d'eau d'autre part, nous avons classé les différents bassins versants étudiés en deux catégories. Les critères de classement sont les suivants :

- **Catégorie A** : bassins pour lesquels les aquifères sont susceptibles de jouer un rôle significatif dans le fonctionnement hydrologique. Conditions : Contribution de l'écoulement rapide (ruissellement) peu important (<20 %) et temps de transit moyen de l'écoulement lent (recharge et vidange) > 20 jours
- **Catégorie B** : bassins pour lesquels les aquifères jouent a priori un rôle peu significatif dans le fonctionnement hydrologique. Conditions : Contribution de l'écoulement rapide (ruissellement) important (>20 %) et temps de transit moyen de l'écoulement lent (recharge et vidange) < 20 jours

Les résultats de synthèse des différents bassins versants sont présentés dans l'illustration 47.

Nom du BV	Cat.	Tps Ec rapide (en j)	Tps Ec lent (en j)	Contribution au ruissellement (écoulement rapide)
Fond Baise	B	0.9	20	30%
Capot Amont	A	0.9	80	10 à 20 %
Capot Aval	A	1.4	30	5 à 15 %
Bassignac	B	1.2	90	30 à 50 %
Alma	A	1.2	30	10%
Lézarde 2	B	0.9	40	20 à 40 %
Lézarde (soudon) *	A	0.9	40	10%
Fond Rousseau	B	0.6	30	30 à 50 %
Dormante	B	0.8	20	30 à 60 %
Petit Bourg	B	0.9	54	30 à 50 %
Fontane	B	0.8	20	30 à 60 %

Illustration 47 : Synthèse des résultats des modélisations TEMPO

5.4. MODELISATION GLOBALE DES RESSOURCES EN EAU

5.4.1. Principe de la modelisation globale

a) Methodologie

Une **approche globale** a été choisie pour établir le bilan hydrologique de la Martinique, compte-tenu :

- de l'objectif du projet qui est de fournir aux décideurs locaux une cartographie des ressources souterraines potentiellement exploitables en Martinique ;
- du contexte géologique particulièrement complexe de l'île (aquifères volcaniques) ;
- du relativement faible nombre de chroniques piézométriques et hydrométriques disponibles.

Le modèle proposé doit contribuer à l'estimation des ressources en eau souterraines exploitables sous différentes contraintes climatiques ou socio-économiques (succession d'années sèches ou augmentation des besoins AEP par exemple).

Classiquement, cette approche de modélisation se décompose en trois étapes : le découpage de la zone étudiée en Unités Hydrologiques (UH), la description des échanges (eau, matière et informations) entre ces UH (transferts « horizontaux ») via l'élaboration d'un schéma conceptuel de fonctionnement, et enfin la description des transferts au sein des UH (transferts « verticaux ») par un modèle de réservoirs en cascade.

Cette méthodologie a déjà été appliquée avec succès, et est en cours d'application, dans plusieurs projets de recherche du BRGM, notamment sur le bassin versant de l'Hérault (projet AGIRE, 2001-2004), la nappe de l'Est lyonnais (projet SOLURB, 2003-2004), la région de Khouribga au Maroc (projet ELMAA, 2005-2008), et dans le cadre d'un projet de service public du BRGM à La Réunion (2006-2008).

Dans le cas présent, du fait de la géographie particulière de la zone d'étude (île de petite taille) et de la disponibilité d'un certain nombre de données géoréférencées, la méthodologie a été adaptée pour travailler à une échelle plus fine que celle du bassin versant.

b) Discrétisation et modèle de réservoirs

Les modèles de réservoirs en cascade permettent, dans de nombreux cas, de simuler correctement la relation pluie-débit sur un bassin versant. Le modèle le plus simple et le plus courant est celui à trois réservoirs superposés (utilisé par défaut dans le logiciel GARDENIA© du BRGM par exemple, voir Illustration 48).

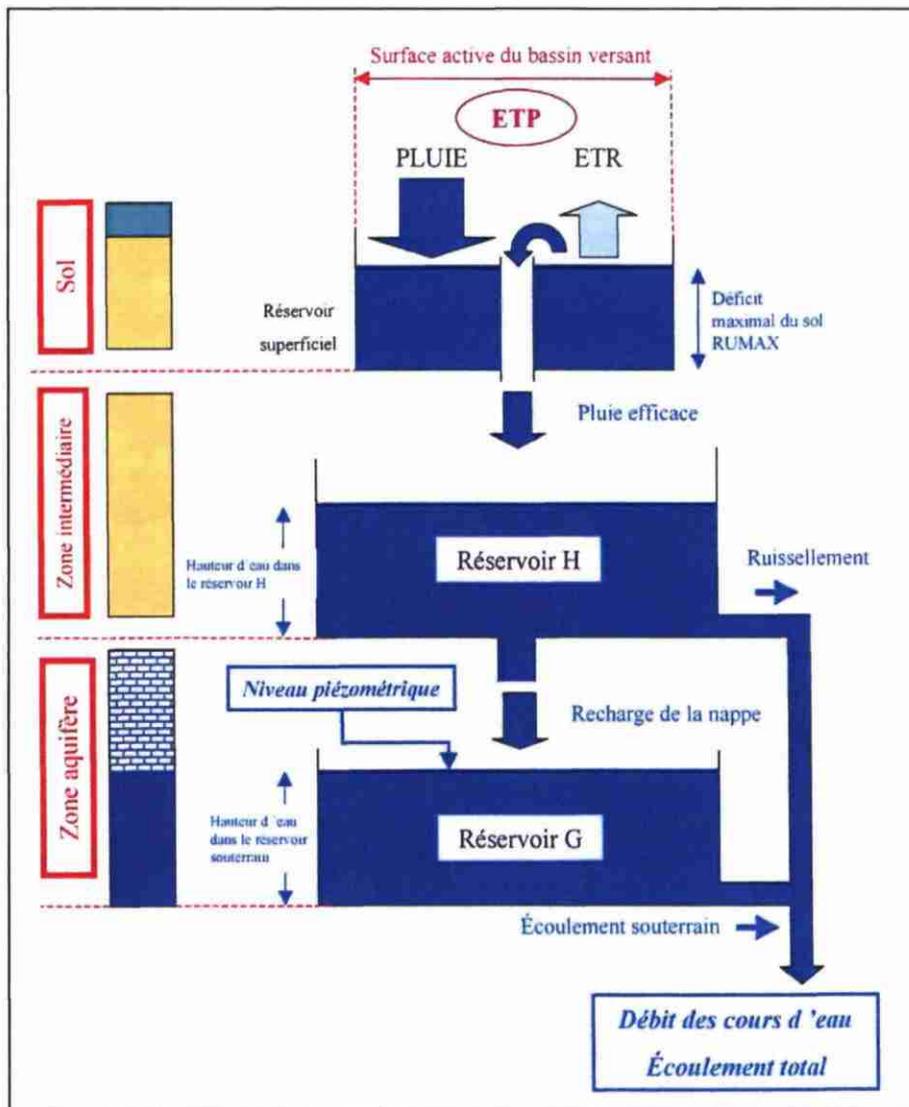


Illustration 48: Bilan hydrologique d'un bassin versant - Modèle de 3 réservoirs en cascade (d'après Thiéry, 2003)

Dans la présente étude, le modèle à trois réservoirs est utilisé pour décrire les transferts « verticaux » au sein des Unités Hydrologiques (UH). La particularité est que, contrairement à l'usage, on ne travaille pas ici à l'échelle du bassin versant pour les

trois réservoirs, mais on introduit un changement d'échelle entre les deux premiers réservoirs (sol, et Zone non saturée-ZNS) et le réservoir nappe.

Ainsi, la Martinique est discrétisée en 1096 mailles carrées de 1 km², pour chacune desquelles le bilan hydrique du sol, l'infiltration et le ruissellement sont calculés (ce qui correspond aux deux premiers réservoirs du modèle). L'île est ensuite découpée en une vingtaine d'Unités Régionales (équivalentes aux UH décrites ci-dessus) à l'échelle desquelles les résultats obtenus à l'étape précédente sont agrégés¹. Ce changement d'échelle permet de calculer les variations de stock dans la nappe et le débit à l'exutoire de chacune des UR (ceci est fait dans le troisième réservoir du modèle).

Un schéma récapitulant le principe de la discrétisation et du changement d'échelle est proposé ci-après (Illustration 49).

¹ somme sur l'ensemble des mailles qui constituent l'UH

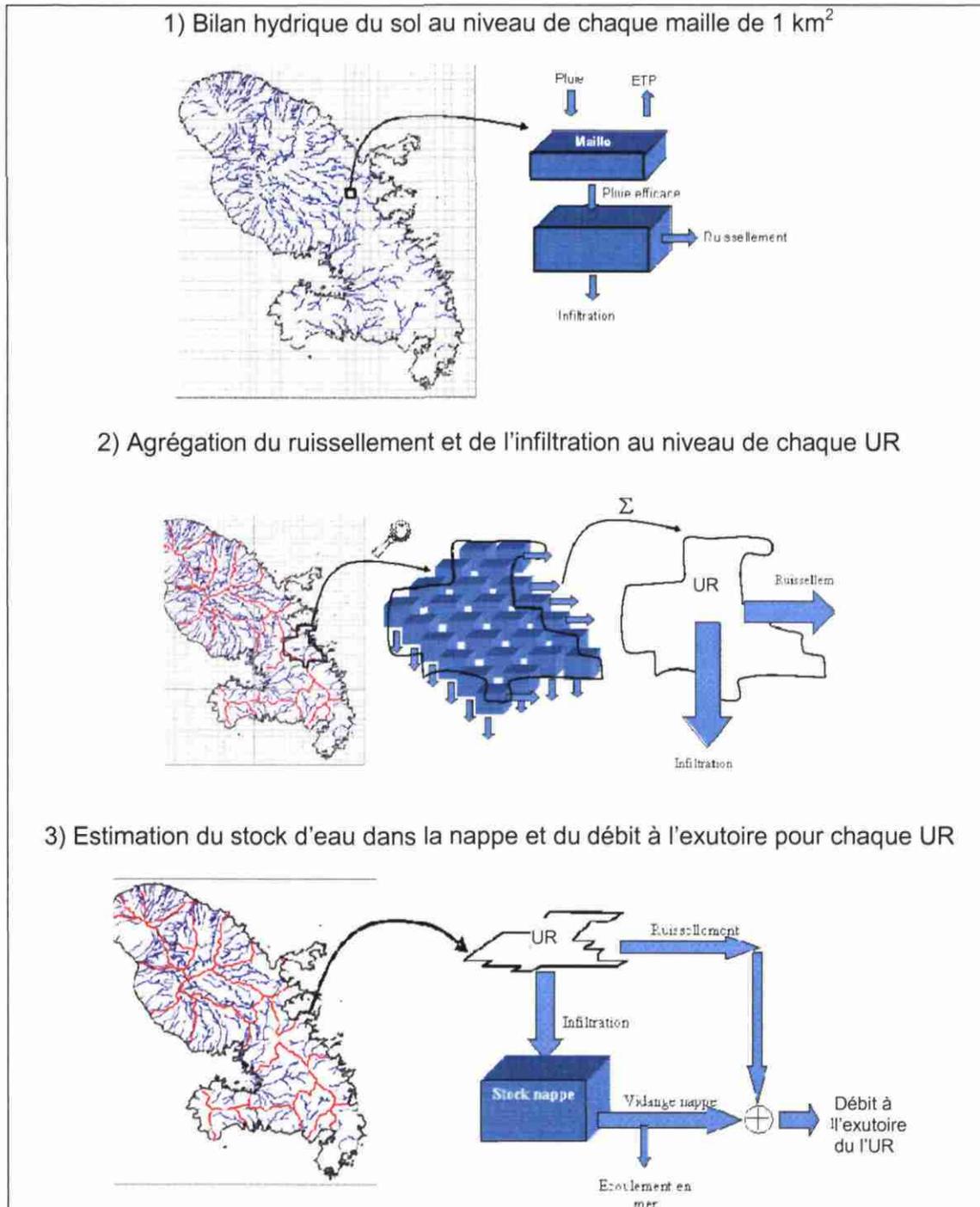


Illustration 49 : Discrétisation spatiale puis agrégation de l'infiltration et du ruissellement à l'échelle des UR

c) Calcul de la pluie efficace

La pluie efficace (P_{eff}) est la quantité d'eau (en mm) disponible pour le ruissellement, l'infiltration, et plus modestement la saturation des sols superficiels. Elle dépend de la pluviométrie (pluie nette), de l'évapotranspiration réelle (ETR, en mm) et du stock d'eau dans le sol (Réserve Utile RU, en mm).

La pluie efficace et l'ETR ont été estimées par bilan hydrologique du sol selon le modèle de Thornthwaite (voir Illustration 50).

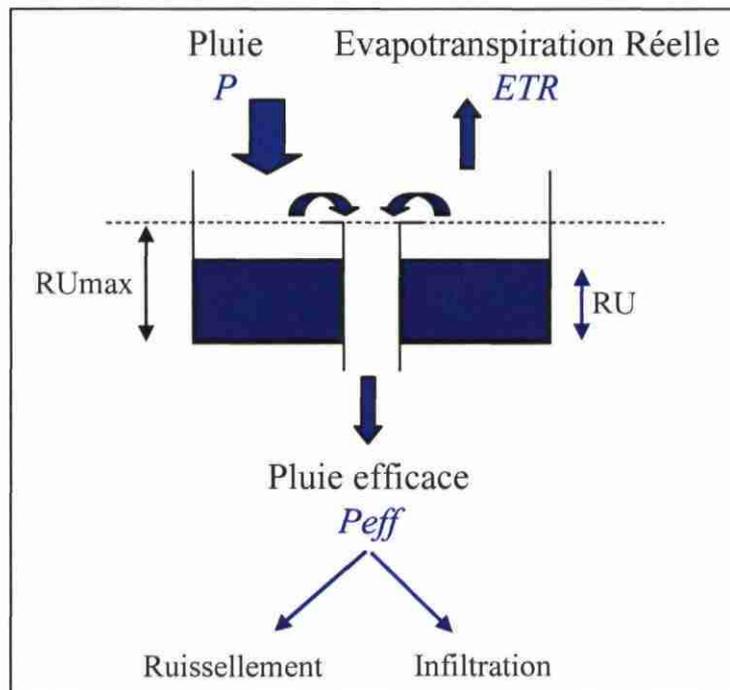


Illustration 50 : Principe du calcul de la pluie efficace

L'ETR est toujours inférieure ou égale à l'ETP². A chaque pas de temps de calcul, si $P > ETP$, il pleut assez pour assurer une évapotranspiration réelle maximale, donc $ETR = ETP$. Sinon ($P < ETP$), l'ETR dépend de la quantité d'eau stockée dans le sol (réserve utile) : si elle est suffisante, $ETR = ETP$ sinon $ETR < ETP$. Ainsi, à chaque pas de temps, la pluie efficace est au maximum égale à $P - ETR$.

² EvapoTranspiration Potentielle fournie par MétéoFrance qui la calcule à partir des données climatologiques (selon la formule de Penman) .

L'algorithme qui en découle pour calculer l'ETR et la pluie efficace (Peff) à chaque pas de temps n est le suivant :

$$ETR^n = \min (ETP^n ; P^n + RU^n)$$

$$Peff^n = P^n - ETR^n + RU^n - RU_{max}$$

Si $Peff^n \leq 0$ alors $Peff^n = 0$

$$RU^{n+1} = \min (RU_{max} ; P^n + RU^n - ETR^n)$$

Pour les zones de cultures, on peut corriger l'ETR pour tenir compte des besoins en eau spécifiques des plantes en fonction du stade phénologique. On introduit pour cela un coefficient cultural Kc tel que : $ETR \text{ corrigée} = Kc * ETR$.

Dans notre modèle appliqué à chaque maille (1 km^2), le bilan hydrique est effectué dans le réservoir supérieur (réservoir « sol »).

d) Calcul du ruissellement et de l'infiltration

Le deuxième réservoir du modèle (réservoir « intermédiaire ») est alimenté par la pluie efficace. Il permet de calculer le ruissellement et l'infiltration pour chaque maille. Physiquement, il représente une zone intermédiaire allant du sol à la nappe.

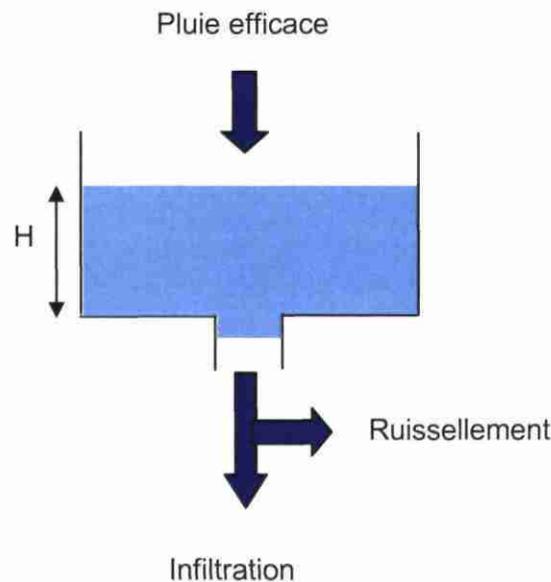


Illustration 51 : Schéma du deuxième réservoir

Le modèle adopté est le suivant : on suppose que le réservoir suit une loi de vidange de Maillet, c'est-à-dire que son débit de vidange est directement proportionnel au volume d'eau qu'il contient. Un tel réservoir, en l'absence d'alimentation, présente une

vidange exponentielle. On suppose de plus que le débit de vidange se répartit entre infiltration et ruissellement selon une proportion constante.

Les équations résolues sont donc les suivantes :

$$\frac{dH}{dt} = P_{eff}(t) - \tau_1.H(t)$$

$$R(t) = \alpha.\tau_1.H(t)$$

$$I(t) = (1 - \alpha).\tau_1.H(t)$$

Avec :

- H la hauteur d'eau dans le réservoir (mm),
- P_{eff} la pluie efficace ($mm.j^{-1}$),
- R le ruissellement ($mm.j^{-1}$),
- I l'infiltration ($mm.j^{-1}$),
- α le coefficient de ruissellement
- τ_1 la constante de temps du réservoir (en j^{-1}) caractéristique du temps de transit moyen.

Pour chaque maille où le modèle est appliqué, il faut donc renseigner deux paramètres (le coefficient de ruissellement et la constante de temps de transit) pour pouvoir calculer l'infiltration et le ruissellement.

e) Calcul du stock dans la nappe et du débit à l'exutoire

Pour chacune des Unités Régionales, un troisième et dernier réservoir est défini (réservoir « aquifère »). Il est alimenté par les infiltrations en provenance des réservoirs intermédiaires de toutes les mailles qui discrétisent l'UR. Il permet de calculer le niveau d'eau dans la nappe ainsi que le débit à l'exutoire du bassin versant. Physiquement, il vise à représenter le fonctionnement des zones aquifères.

Ce réservoir fonctionne comme le précédent : il suit une loi de Maillet, son débit de vidange est directement proportionnel au volume d'eau qu'il contient. Le débit à l'exutoire est égal au débit de vidange du réservoir (Q_{nap}) plus le débit ruisselé issu des réservoirs supérieurs et moins les éventuelles pertes en mer (supposées être une fraction constante du débit de vidange) et prélèvements anthropiques (AEP, irrigation).

Les équations résolues sont donc les suivantes :

$$\frac{dV}{dt} = \sum I(t) - \tau_2.V(t) - \sum P(t)$$

$$Q_{nap}(t) = (1 - \beta).\tau_2.V(t)$$

$$Q_{riv}(t) = Q_{nap}(t) - \sum C(t)$$

Avec :

- V le volume d'eau dans le réservoir (m^3),
- I l'infiltration ($m^3.j^{-1}$),
- P les prélèvements dans la nappe (forages, en $m^3.j^{-1}$)
- Q_{nap} le débit de vidange de la nappe qui alimente la rivière ($m^3.j^{-1}$)
- β le coefficient de fuite en mer
- τ_2 la constante de temps du réservoir (en j^{-1}) caractéristique du temps de transit moyen.
- Q_{riv} le débit de la rivière à son exutoire ($m^3.j^{-1}$)
- C les prélèvements en rivière (captages, en $m^3.j^{-1}$)

Pour chaque UR, il faut donc renseigner deux paramètres (le coefficient de pertes en mer et la constante de temps de transit) pour pouvoir calculer le débit à l'exutoire. Le fait de travailler avec la variable « volume » plutôt que la variable « niveau » d'eau permet de supprimer deux paramètres du modèle (la surface de l'UR et son coefficient d'emménagement). Si on s'intéresse à la valeur absolue du stock d'eau dans la nappe (et non pas uniquement à ses variations) il faut de plus fournir une estimation du niveau de base (ou V_0) en dessous duquel le niveau d'eau est supposé, dans le modèle, ne jamais descendre.

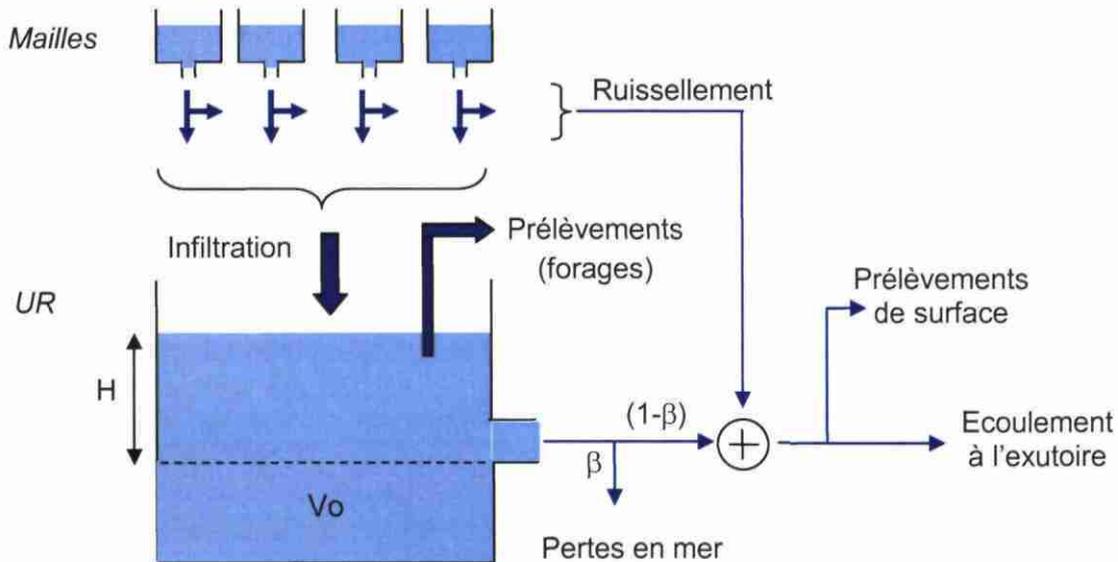


Illustration 52 : Schéma du troisième réservoir

5.4.2. Application à la Martinique

a) Découpage de l'île en Unités Régionales (UR)

Dans le cadre de la présente étude, un travail d'expertise géologique et hydrogéologique, prenant en compte le réseau hydrographique et la topographie mais également la connaissance naturaliste du terrain a permis d'identifier 24 entités Régionales sur l'île de la Martinique. Bien que regroupant plusieurs rivières pérennes, ces entités constituent des bassins versants, au sens où toute goutte de pluie tombant sur l'une d'elle est supposée y rester (soit en rejoignant un des cours d'eau de surface de l'unité, soit en s'infiltrant dans une nappe liée à l'unité, et uniquement à elle). Il n'y a donc pas, en théorie, d'échange naturel d'eau (de surface ou souterraine) entre ces entités.

Compte-tenu des autres informations disponibles (pluviométrie, ETP, nature du sol / R_Umax, occupation du sol, pentes), il paraît raisonnable de considérer que ces entités constituent des unités homogènes pour la gestion des ressources en eau.

Le découpage de la Martinique en **24 Unités Régionales** est proposé dans le cadre de l'approche mise en œuvre (Illustration 53).

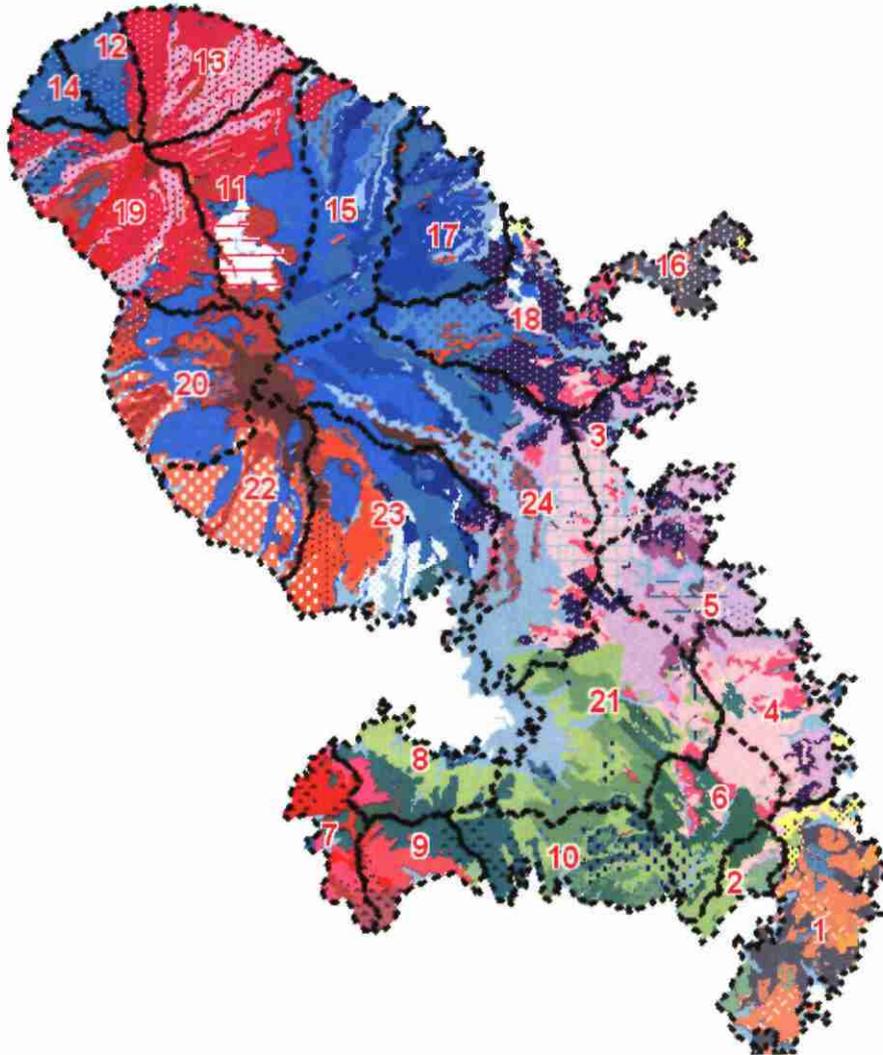


Illustration 53 : Découpage de la Martinique en 24 Unités Régionales

b) Calcul de la pluie efficace à l'échelle du km²

Pour appliquer le modèle de Thornthwaite et calculer la pluie efficace à l'échelle de mailles de 1km² sur l'ensemble de la Martinique, il est nécessaire de disposer, pour chacune des mailles, des informations suivantes :

- une chronique de pluie (pas de temps journalier),
- une chronique d'ETP sur la même période et au même pas de temps,
- la valeur de la Réserve Utile maximale du sol,
- les valeurs des coefficients culturaux pour les principales cultures et leurs variations en fonction du stade phénologique des plantes.

Or, les données exploitables dont on dispose sont les suivantes (voir Annexe 2) :

- chroniques de pluie journalières sur une période commune (1986-1997) en une vingtaine de points (*source : DIREN, Météo France*),
- chroniques d'ETP journalière à Fort de France (*source : Météo France*),
- coefficients culturaux de la canne et de la banane et description des stades phénologiques (*source : INRA / Météo France*),
- réserve Utile maximale des sols en 25 stations climatologiques (*source : INRA / Météo France*),
- carte de la capacité de rétention en eau des sols (*source : BRGM / IRD, 2003*),
- carte des isohyètes moyennes annuelles (*source : Météo France*),
- carte des iso-ETP moyennes annuelles (*source : Météo France*),
- découpage de l'île en 14 zones pluviométriquement homogènes (*IRD, 2003*),
- carte simplifiée d'occupation des sols (*d'après BD Topo IGN et données IRD*).

Il convient donc de procéder à un traitement des données afin de pouvoir calculer la pluie efficace à l'échelle de mailles de 1 km². La procédure qui a été appliquée pour extrapoler les données existantes et les discrétiser est présentée ci-dessous.

- **Discrétisation des cartes et création de matrices de coefficients**

Une grille avec un pas d'espace de 1 km a été choisie pour discrétiser les diverses cartes (isohyètes et iso-ETP en particulier). Cette opération a été réalisée avec le logiciel ArcMap© qui génère un fichier ASCII pour chaque carte. Ceux-ci sont ensuite importés dans le logiciel Matlab©. Chaque carte est ainsi transformée en une matrice de 55 lignes x 48 colonnes (soit 2 640 mailles) contenant les valeurs de la variable associée³. Une valeur unique est attribuée à tous les coefficients qui correspondent à des mailles situées en mer. Une visualisation des cartes discrétisées (telles qu'elles sont utilisées en entrée du modèle numérique) est présentée en Annexe 3.

- **Génération d'une chronique de pluie journalière pour chaque maille**

Il s'agit d'abord de choisir pour chacune des 14 Zones Pluviométriquement Homogènes (ZPH) un pluviomètre « de référence », parmi les 26 pluviomètres (DIREN et Météo France) pour lesquels on dispose de mesures journalières continues sur la période 1986-1997. Les deux pluviomètres pour lesquels la pluie moyenne annuelle calculée à partir des chroniques disponibles ne correspondait pas avec la carte des

³ Les coordonnées du coin supérieur gauche de la zone discrétisée sont : (689000 ;1646000) (UTM20 Fort-Desaix)

isohyètes ont été éliminés⁴. A défaut de pluviomètre validé dans la zone 5 (littoral sud), on propose d'utiliser les données fournies par le pluviomètre du Vaucelin (situé en zone 4). La carte des pluviomètres de référence est présentée sur l'illustration 54.

On affecte ensuite à toutes les mailles situées dans une même ZPH la chronique du pluviomètre de référence de cette zone, corrigée par un coefficient multiplicatif pour tenir compte -entre autre- de l'altitude. Pour chaque maille, ce coefficient correcteur est égal au rapport entre la pluviométrie moyenne annuelle de la maille fournie par la carte des isohyètes discrétisée et la pluviométrie moyenne annuelle mesurée au pluviomètre de référence (voir valeurs sur Illustration 54).

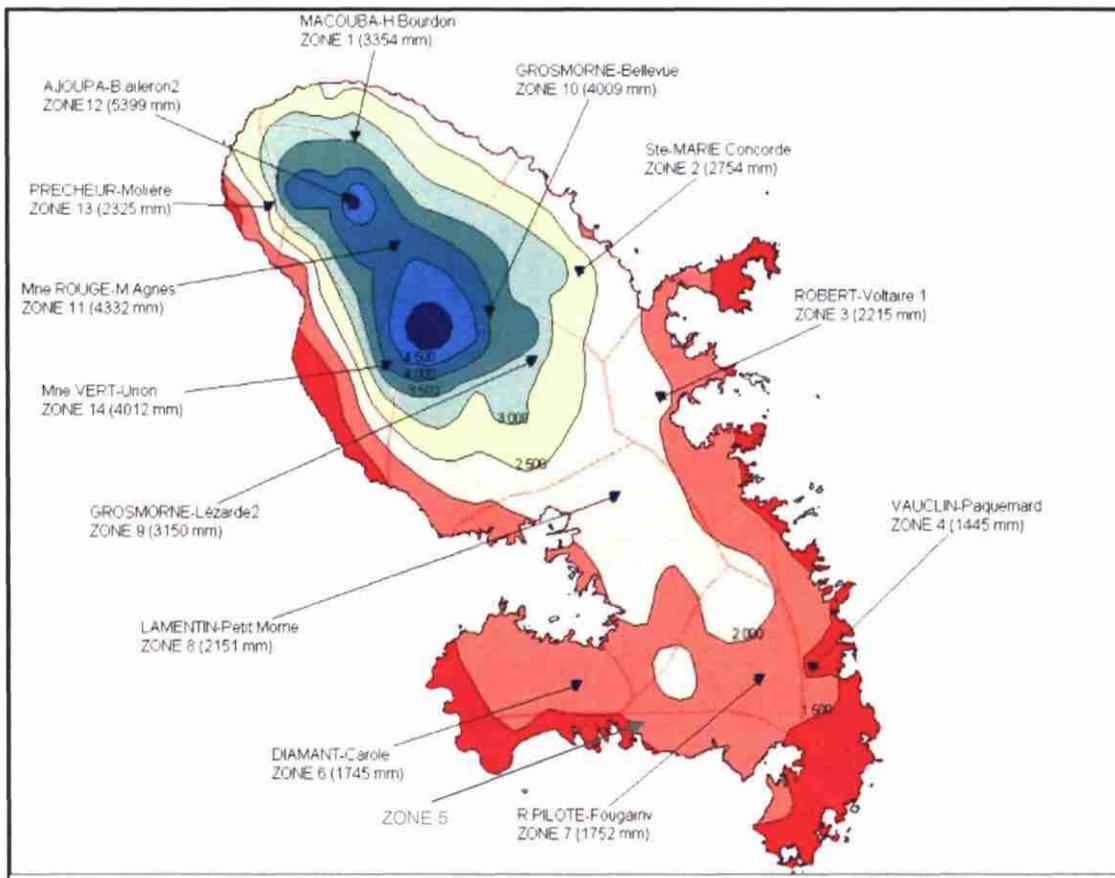


Illustration 54 : Isohyètes, zones pluviométriquement homogènes et pluviomètres de référence.

⁴ Il s'agit des pluviomètres de Prêcheur Grande Savane (4388 mm mesurés contre une valeur lue sur la carte comprise entre 3500 et 4000 mm) et d'Ajoupa Aileron1 (2821 mm mesurés contre une valeur lue sur la carte comprise entre 4500 et 5000 mm).

- **Generation d'une chronique d'ETP journaliere pour chaque maille**

La demarche est plus simple que pour la pluie puisqu'on ne dispose que d'une seule chronique d'ETP (station de Fort de France). On affecte donc cette chronique a chaque maille de l'ile, en la multipliant par le rapport entre l'ETP moyenne annuelle de la maille fournie par la carte des iso-ETP discretisee et l'ETP moyenne annuelle a la station de Fort de France (1670 mm).

- **Etablissement de la carte des RUm_{max}**

Cette carte des RUm_{max} (Illustration 55) est etablie en croisant les donnees disponibles, a savoir une carte des classes de capacite de retention des sols (faible, moyenne, forte) et 25 mesures ponctuelles de reserve utile maximale (voir Annexe 2).

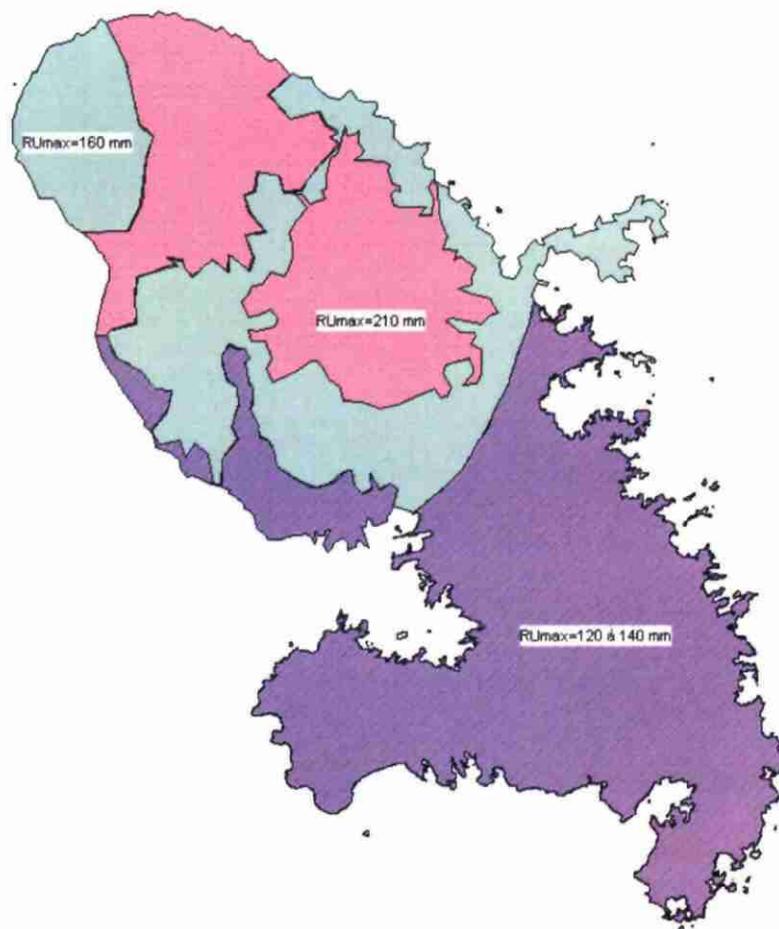


Illustration 55 : Carte des Reserves Utiles maximale des sols

- **Génération de chroniques de Kc**

A partir des valeurs données pour chacun des stades phénologiques, des fonctions temporelles ont été construites pour représenter les variations saisonnières des coefficients culturaux de la banane et de la canne à sucre.

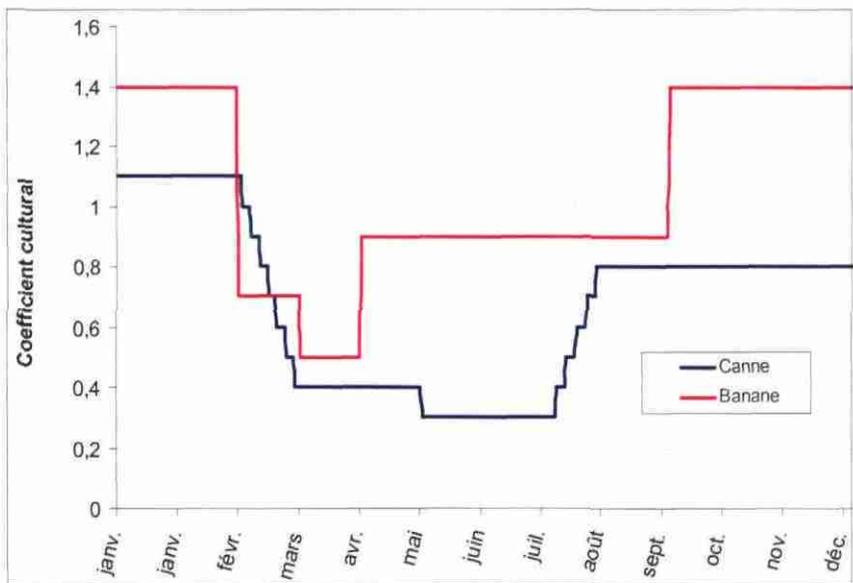


Illustration 56 : Variation des coefficients culturaux de la canne et de la banane au cours de l'année

A noter que pour la banane, le cycle végétatif est en réalité de 9 mois, mais se déplace dans le temps et varie d'une bananeraie à l'autre. Ceci n'a pas pu être pris en compte pour générer les chroniques de Kc.

c) Calcul du ruissellement et de l'infiltration à l'échelle du km²

Dans le modèle à trois réservoirs, la pluie efficace est répartie entre ruissellement et infiltration à l'échelle de chaque maille au niveau du réservoir intermédiaire. Les équations qui décrivent le fonctionnement de ce réservoir comprennent deux paramètres qu'il faut estimer : le coefficient de ruissellement et la constante de temps (inverse du temps de transit).

- **Le coefficient de ruissellement (α)**

Le coefficient de ruissellement dépend principalement de la topographie (pentes), mais aussi du couvert végétal, de la nature des sols (% d'argile) et des formations

geologiques affleurantes. Il est impossible de le mesurer a l'echelle macroscopique qui nous interesse.

Dans le cadre de cette etude, les valeurs des coefficients de ruissellement ont ete estimees en supposant une contribution de l'ordre de 30% pour le relief et de l'ordre de 70% pour la nature du sol et du sous-sol : $\alpha = A.(0.3 * coeff_pente + 0.7 * coeff_sol)$

La contribution de la pente au ruissellement (Illustration 57) est issue de la bibliographie (rapport BRGM/RP-54404-FR, 2006). Elle est definie a l'echelle de chaque maille. La contribution du sol et du sous-sol au ruissellement est en revanche imposee au niveau de chaque UR. Les valeurs de *coeff_sol* ont ete ajustees lors du calage du simulateur :

Pente (en %)	Coeff_pente
<2	0
2 à 5	5%
5 à 8	10%
8 à 16	25%
16 à 30	40%
30 à 45	70%
>45	85%

Illustration 57 : contribution de la pente au ruissellement

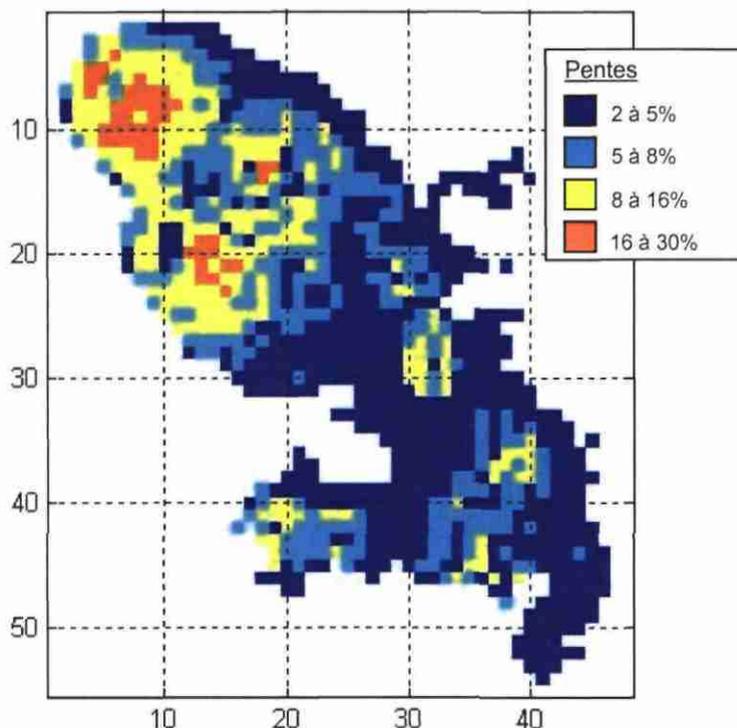


Illustration 58 : Carte discrétisée des pentes de la Martinique

- **La constante de temps (τ_1)**

Les constantes de temps ont été fixées par défaut à 1 j^{-1} dans chaque maille. Il s'agit d'un compromis entre les valeurs estimées lors de la modélisation pluie-débit (voir §5.3, Illustration 47), comprises entre 0.71 et 1.25 j^{-1} , et les critères de convergence numérique du modèle⁵. Ces valeurs ont été diminuées (i.e. augmentation du temps de transit) lors du calage du simulateur pour les UR18, 20, 22 et 24.

d) Calcul des stocks et débits à l'échelle des UH

Le débit à l'exutoire de chaque UR et le stock d'eau dans la nappe sont calculés dans le troisième réservoir. Celui-ci comprend deux paramètres : une constante de temps (τ_2), inverse d'un temps de transit moyen, et un coefficient de fuite en mer (β). Le calcul du stock d'eau et du débit à l'exutoire doit également tenir compte des prélèvements d'eau, soit directement dans la nappe (forages), soit dans la rivière (captages pour l'AEP ou l'irrigation).

⁵ Difficulté de convergence lorsque le temps de transit dans le réservoir est inférieur au pas de temps de la résolution (qui est en l'occurrence journalier).

- **Le temps de transit moyen dans la nappe (τ_2)**

Les differentes UR ont ete reparties, a dire d'experts, en 4 categories selon leur temps de transit moyen dans la nappe (τ_2), en s'appuyant sur les resultats de la modelisation pluie-debit realisee sur les quelques bassins instrumentes (Illustration 47). Ces valeurs par defaut ont ete modifiees lors du calage pour deux UR (UR1 et UR9).

Temps de transit moyen dans la nappe	τ_2 (j ⁻¹)	UR
20 jours	0.05	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 16
30 jours	0.033	20, 22, 23
50 jours	0.02	6, 21
90 jours	0.0111	11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 24

Illustration 59 : Valeurs par defaut du temps de transit moyen dans la nappe pour chaque UR

- **Le coefficient de fuite en mer (β)**

Il est difficile de donner une valeur au parametre β qui quantifie les fuites en mer, celles-ci etant inconnues car non mesurees ou estimees en Martinique. On est donc parti du constat simple suivant : les bassins qui sont les plus en contact avec la mer sont ceux qui sont susceptibles d'avoir les fuites en mer les plus importantes (voir Illustration 60). On a donc defini un facteur de forme (F) pour chacune des UR, egal a la longueur du rivage de l'UR (L_{litt}) divise par la somme de cette longueur et de la longueur du cours d'eau perenne principal (L_{riv}).
$$F = \frac{L_{litt}}{L_{riv} + L_{litt}}$$

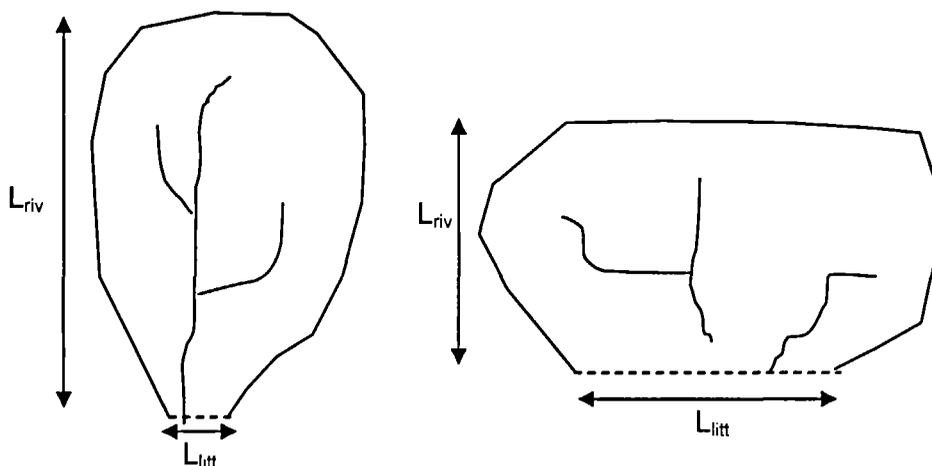


Illustration 60 : Définition du facteur de forme pour une UH

Par défaut, on impose β égal au facteur de forme pour toutes les UR. Ces valeurs ont été modifiées au moment du calage pour les UR 9, 19 et 22. On a cependant constaté que ce paramètre a un impact relativement peu important sur les débits simulés (voir Annexe 6).

UR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F	62%	73%	47%	31%	32%	6%	77%	33%	38%	27%	1%	15%
UR	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
F	12%	26%	7%	⁶	15%	15%	17%	13%	7%	16%	11%	4%

Illustration 61 : Facteur de forme de chaque UR

• Les prélèvements d'eau

En Martinique, il y a très peu de forages exploités pour l'AEP ou l'industrie. Les seuls prélèvements dans la nappe à prendre en compte dans le modèle sont les suivants : 3 forages dans le bassin de la Rivière Capot représentant un débit de pompage de 60 m³/j dans l'UR11 et 310 m³/j dans l'UR13, et un groupe de forages sur le versant ouest de la Montagne Pelée avec un débit de 1400 m³/j (UR19).

⁶ Cette UR correspond à la presqu'île de la Caravelle. Le coefficient n'a pas été calculé pour cette UR compte-tenu de sa situation particulière. Il sera supposé nul par la suite.

Les prélèvements d'eau de surface pour l'AEP (captages de source ou prises d'eau en rivière, voir Illustration 62, données 2004, DIREN et CG) sont supposés constants au cours de l'année à défaut de plus d'information sur leur répartition temporelle. Cette hypothèse affecte peu les résultats (i.e. les débits simulés à l'exutoire) dans la majorité des cas puisque les débits des rivières sont largement supérieurs aux prélèvements. Mais la situation est différente pour les UR22 et 23 où les prélèvements sont très importants puisqu'ils alimentent en eau les communes de Fort-de-France et de Schoelcher. Il en résulte que si on impose un débit de prélèvement en rivière constant sur toute l'année hydrologique, on obtient des débits négatifs aux périodes d'étiage. Pour en tenir compte, et pour ces deux seules UR (22 et 23), le débit annuel de prélèvement a été réparti sur l'année de façon pragmatique afin de ne jamais assécher les cours d'eau (Illustration 63).

UR	Localisation	Captage	Débit en m ³ /j
11	Rivière Capot	Vivé 3 sources AEP	35 000 830
	Rivière Chanflor	1 source	240
13	Rivière Capot	2 sources AEP	8
15	Rivière Lorrain	Prise d'eau rivière (PER)	4 800
19	Pelée ouest	1 source AEP	5 520
20	Carbet	1 source AEP	340
22	Schoelcher	PER	13 700
23	Fort de France	PER	11 000
24	Lézarde Haut	PER Blanche Bouliki	25 000
		SICSM	24 000
		Prise d'eau Lézarde	17 280

Illustration 62 : Débits moyens journaliers des prélèvements d'eau de surface

Mois	% du débit annuel	Débits de captage utilisés dans le modèle	
		Débit moyen journalier (m ³ /j) UR22	Débit moyen journalier (m ³ /j) UR23
Janvier	210%	28 766	23 100
Février	90%	12 328	9 900
Mars	40%	5 479	4 400
Avril	10%	1 370	1 100
Mai	10%	1 370	1 100
Juin	10%	1 370	1 100
Juillet	10%	1 370	1 100
Aout	30%	4 109	3 300
Septembre	90%	12 328	9 900
Octobre	180%	24 656	19 800
Novembre	260%	35 615	28 600
Décembre	260%	35 615	28 600

Illustration 63 : Répartition mensuelle théorique des débits prélevés au sein des UR22 et 23

Les captages pour irrigation sont quant à eux très mal connus. On dispose en effet de valeurs de débits⁷ en m³/h, mais sans aucune indication concernant les périodes d'irrigation (nombre d'heures par jour et de jours par an). Dans ces conditions, pour éviter des hypothèses abusives et en tenant compte du fait que ces prélèvements demeurent largement inférieurs à ceux destinés à l'AEP, il a été décidé de ne pas les prendre en compte dans les calculs.

⁷ Données DIREN

5.4.3. Modélisation numérique

a) Développement d'un simulateur numérique

Un simulateur numérique dédié à la modélisation globale du cycle de l'eau en Martinique a été développé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink®, particulièrement bien adapté pour manipuler des vecteurs et matrices.

Très simple d'utilisation et doté d'une interface graphique explicite (qui reproduit les trois réservoirs, voir Illustration 64), le simulateur permet :

- de traiter les données d'entrée de façon à affecter à chaque maille les paramètres et chroniques climatologiques ad hoc ;
- de résoudre simultanément les équations qui décrivent le fonctionnement des trois réservoirs pour chaque maille / UR.

Un jeu de données d'entrée a été créé au format requis. Il est facilement modifiable. De plus, différents scripts Matlab ont été écrits et sauvegardés afin d'effectuer le post-traitement des résultats (calcul et vérification des bilans, calcul des cumuls et moyennes mensuels et annuels, extraction de chroniques de pluie efficace en certains points particulier, etc.). Les résultats peuvent être ensuite directement copiés dans un fichier Excel, lus en format ASCII par exemple.

La résolution numérique des équations différentielles est réalisée selon la méthode d'Euler à pas fixe ($\Delta t = 1$ jour). Une simulation sur une période de 11 ans nécessite environ 5 minutes de calcul, la partie « pré-traitement » des données étant la plus contraignante en terme de temps de calcul.

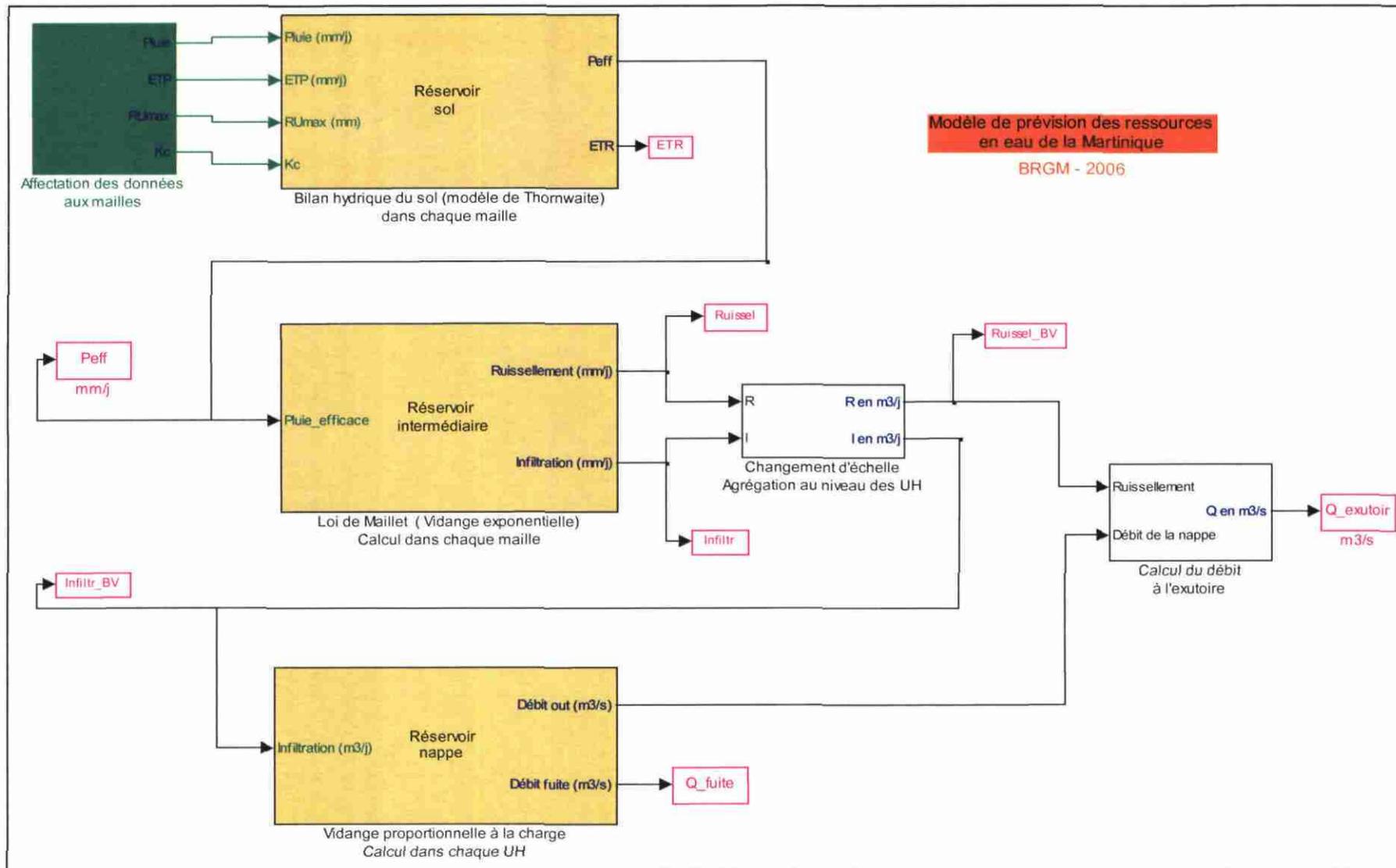


Illustration 64 : Capture d'écran du simulateur numérique

Légende : Blocs oranges = réservoirs ; bloc vert = prétraitement des données d'entrée ; boîtes roses = sauvegarde des variables

b) Validation du simulateur

Le modèle global des ressources en eau de la Martinique proposé, ainsi que le simulateur qui en est la traduction numérique, ne peuvent pas être validés au sens strict. D'abord, parce qu'il s'agit d'un modèle global, destiné à estimer les variations de stocks et de débits en fonction de diverses contraintes naturelles ou anthropiques, et non pas à reproduire fidèlement les valeurs absolues de ces variables. D'autre part, parce que l'on manque considérablement de données expérimentales pour caler puis valider le modèle : géométrie des réservoirs aquifères, suivi continu sur plusieurs années des niveaux piézométriques, mesures en continu des débits des cours d'eau aux exutoires, etc.

Malgré tout, la démarche scientifique impose :

- de vérifier le simulateur, c'est-à-dire de s'assurer qu'il résout bien les équations du modèle mathématique des trois réservoirs (il s'agit donc de vérifier indirectement qu'il n'y a ni erreur de programmation, ni problème de convergence),
- de donner à l'utilisateur des éléments de confiance dans les résultats du modèle et de montrer qu'il possède une précision satisfaisante pour l'usage auquel on le destine, à l'échelle régionale convenue.

Les différentes approches qui ont été mises en oeuvre pour satisfaire ces objectifs sont présentées ci-dessous.

Vérification du calcul de la pluie efficace

La première vérification a consisté à calculer manuellement, à partir des données d'entrée (pluie et ETP), le bilan hydrique du sol en deux endroits distincts pendant quelques jours consécutifs, puis à comparer les résultats obtenus à ceux fournis par le modèle. Ce simple calcul a permis de montrer que l'algorithme de Thornthwaite avait été traduit numériquement dans le simulateur sans erreur.

Une simulation a ensuite été réalisée sur la période du 01/01/76 au 31/12/82. Les résultats obtenus à l'endroit de la station climatologique du Lamentin ont été extraits (Illustration 65) puis comparés qualitativement aux résultats obtenus sur la même période et au même endroit par Requieg (1986)⁸. Il ressort de cette comparaison « visuelle » que les deux modèles donnent des résultats similaires et cohérents, même si celui présenté dans ce rapport sous-estime légèrement la pluie efficace par rapport à celui de Requieg.

⁸ Résultats obtenus avec un modèle de calcul de l'ETR légèrement différent de celui que nous avons adopté.

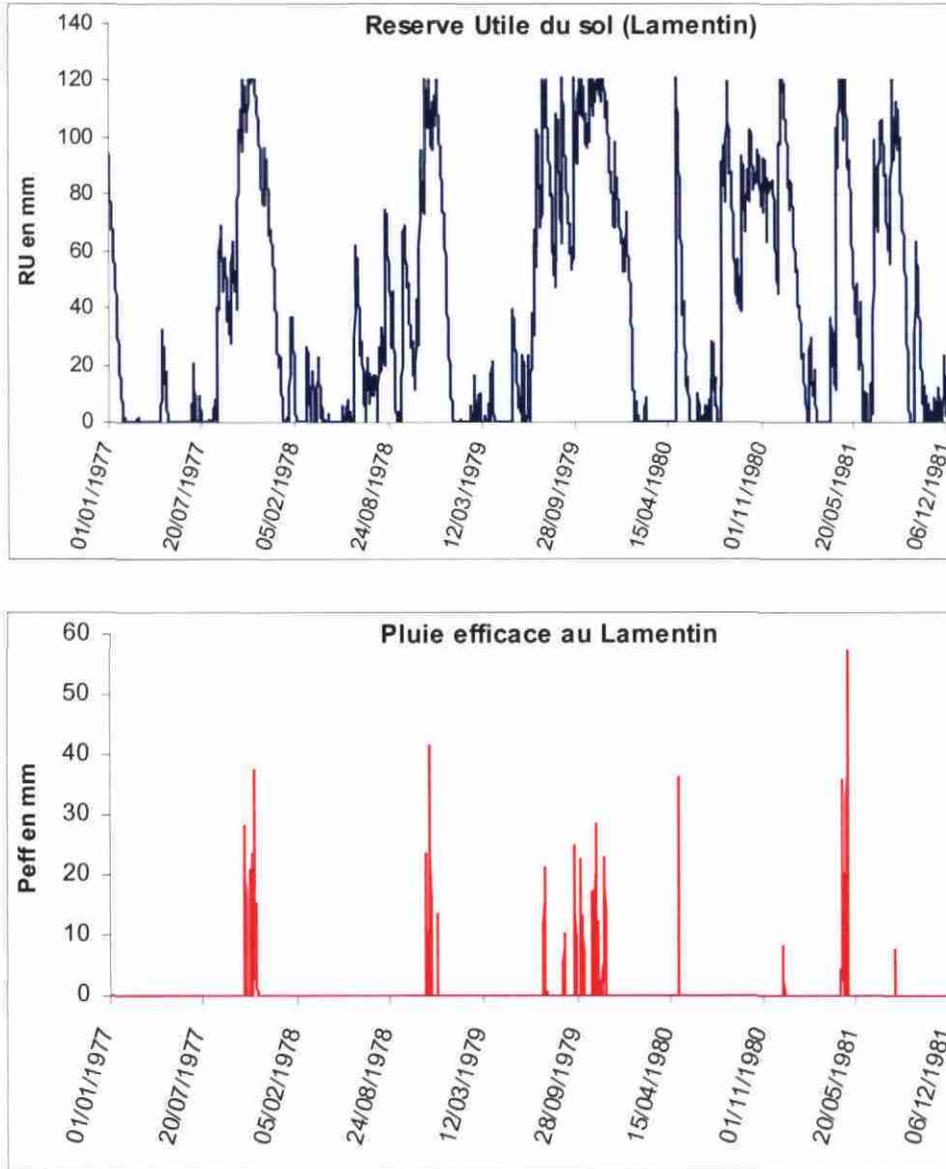


Illustration 65 : Bilan hydrique du sol au Lamentin (1977-1981) calculé au moyen du simulateur

Vérification des bilans

Il s'agit de vérifier que sur une période donnée, la quantité d'eau qui rentre dans le modèle est égale à la quantité qui en sort majorée de la quantité qui y est stockée. Ce bilan est également vérifié au niveau de chaque réservoir.

L'erreur relative sur le bilan s'exprime de la façon suivante :

$$\varepsilon = \frac{(\sum Entrées - \sum Sorties - \sum Stocks)}{\sum Entrées}$$

	Réservoir SOL	Réservoir Intermédiaire	Réservoir Nappe	Modèle entier
ENTREE	Pluie	Pluie efficace	Infiltration	Pluie
SORTIE 1	ETR	Ruissellement	Débit vidange nappe	ETR
SORTIE 2	Pluie efficace	Infiltration	Fuite en mer	Débit à l'exutoire
SORTIE 3			Forages	Fuites en mer
SORTIE 4				Forages + captages
STOCK	Reserve Utile	Stock ZNS	Stock nappe	RU + ZNS + Nappe

Illustration 66 : Termes des bilans hydriques pour chaque compartiment du modèle

Les résultats obtenus sur les différentes simulations réalisées sur la période 1986-1997 montrent que tous les bilans sont corrects avec une erreur relative inférieure à 0.05%.

Cette étude a toutefois permis de mettre en évidence un problème de convergence lorsque la constante de temps τ_1 imposée dans le réservoir intermédiaire est strictement supérieure à $1j^{-1}$ (d'où un temps de transit très rapide, inférieur à 1 jour, ce qui correspond au pas de temps de la résolution). Dans ce cas, l'erreur sur le bilan du réservoir intermédiaire peut atteindre 25%. Pour éviter ce problème, τ_1 a été fixé à $1j^{-1}$ dans toutes les mailles.

Comparaison pluie efficace calculée – débits mesurés pour quelques bassins

On dispose de mesures hydrométriques⁹ sur plusieurs années pour 11 bassins versants de la Martinique. Il est alors intéressant de comparer le cumul annuel de pluie efficace et le cumul du débit à l'exutoire (plus les prélèvements), afin de vérifier que ces deux variables sont du même ordre de grandeur, aux stocks et fuites en mer près.

Les résultats sont présentés sur le graphe suivant (et en Annexe 4). Chaque point représente une année hydrologique (de juin à mai) comprise entre 1986 et 1997 (le nombre d'années disponibles varie selon les points de mesure). Des symboles différents sont utilisés pour distinguer chaque station hydrométrique.

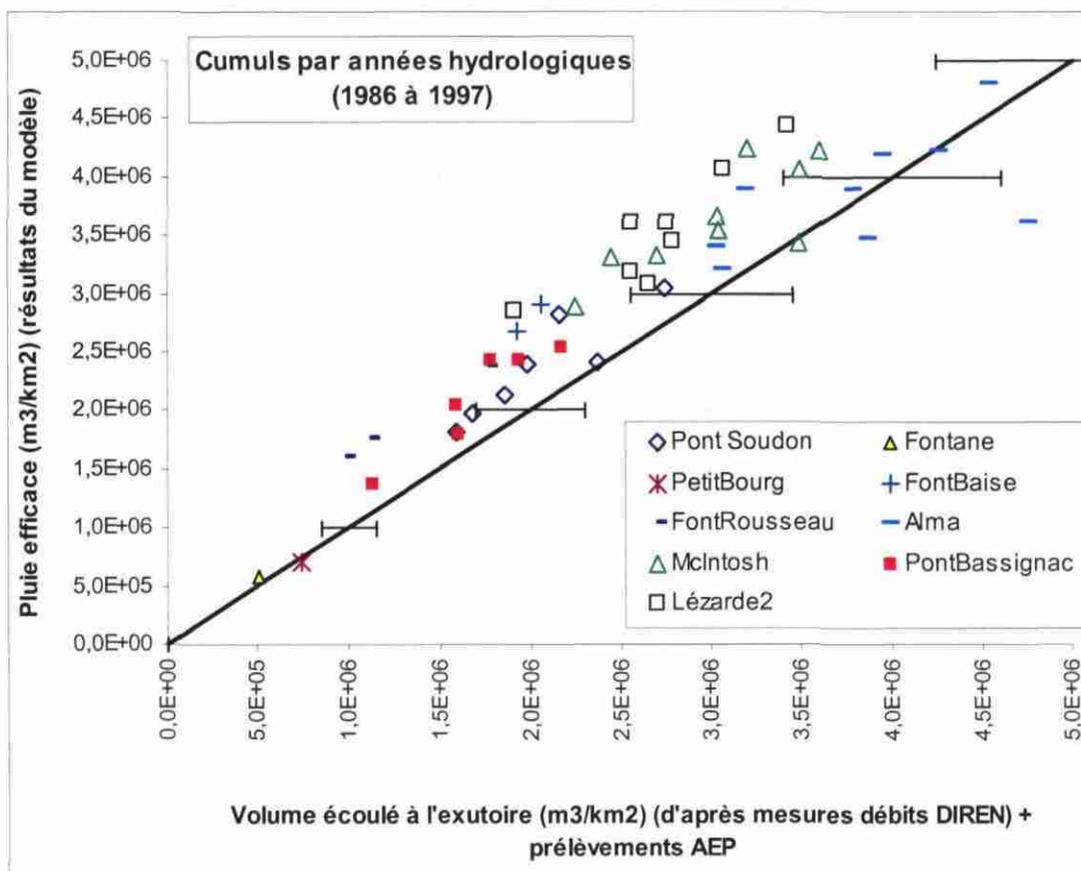


Illustration 67 : Comparaison Pluie efficace – débit à l'exutoire pour 11 BV instrumentés

Pour interpréter ce graphique, il faut avoir à l'esprit qu'une égalité parfaite entre la variable « pluie efficace cumulée » et la variable « débit à l'exutoire cumulé »

⁹ Données DIREN

impliquerait qu'il n'y pas de stockage ou de déstockage dans l'UR (ni dans le sol, ni dans la zone non saturée, ni dans la nappe) et aucune fuite en mer. Ce n'est évidemment pas le cas.

Dans ces conditions, et en tenant compte du fait que les mesures de débit ont une précision de 15%¹⁰, on constate une bonne corrélation entre les deux variables, ce qui conforte le modèle qui a été développé pour calculer la pluie efficace à l'échelle des mailles de 1 km². On note tout au plus une légère tendance du modèle à surestimer les pluies efficaces pour la majorité des stations hydrométriques.

c) Calage du simulateur

Le calage du simulateur concerne les paramètres des réservoirs « intermédiaires » et « nappe », à savoir α , τ_1 , β et τ_2 .

Données expérimentales disponibles

Sur la période simulée (1986-1997), on dispose de mesures continues de débit¹¹ uniquement pour 7 des 24 UR. De plus, il n'existe aucune chronique piézométrique (le réseau de suivi en continu n'a été mis en service qu'en 2005¹²) : on ne dispose donc que de relevés plus ou moins réguliers, et ceci pour seulement 5 UR. Les points de mesure sont localisés sur l'illustration 68.

Les chroniques hydrométriques fournissent le débit des cours d'eau en certains points (souvent bien en amont de l'exutoire), alors que le modèle calcule le débit qui correspondrait à un exutoire unique « fictif » pour chaque UR. Pour contourner ces différences (sans toutefois les oublier), on comparera par la suite les débits spécifiques simulés et observés (c'est-à-dire les débits rapportés à la surface du bassin versant considéré).

¹⁰ cette barre d'erreur est indiquée sur le graphe

¹¹ DIREN (Com. Pers.)

¹² Le réseau de suivi en continu a été initié en 2003 par le BRGM et le MEDD dans le cadre du réseau de suivi piézométrique national. Le suivi en continu a débuté pour 10 points début 2005 et comprend, à fin 2006, 33 points suivis en continu.

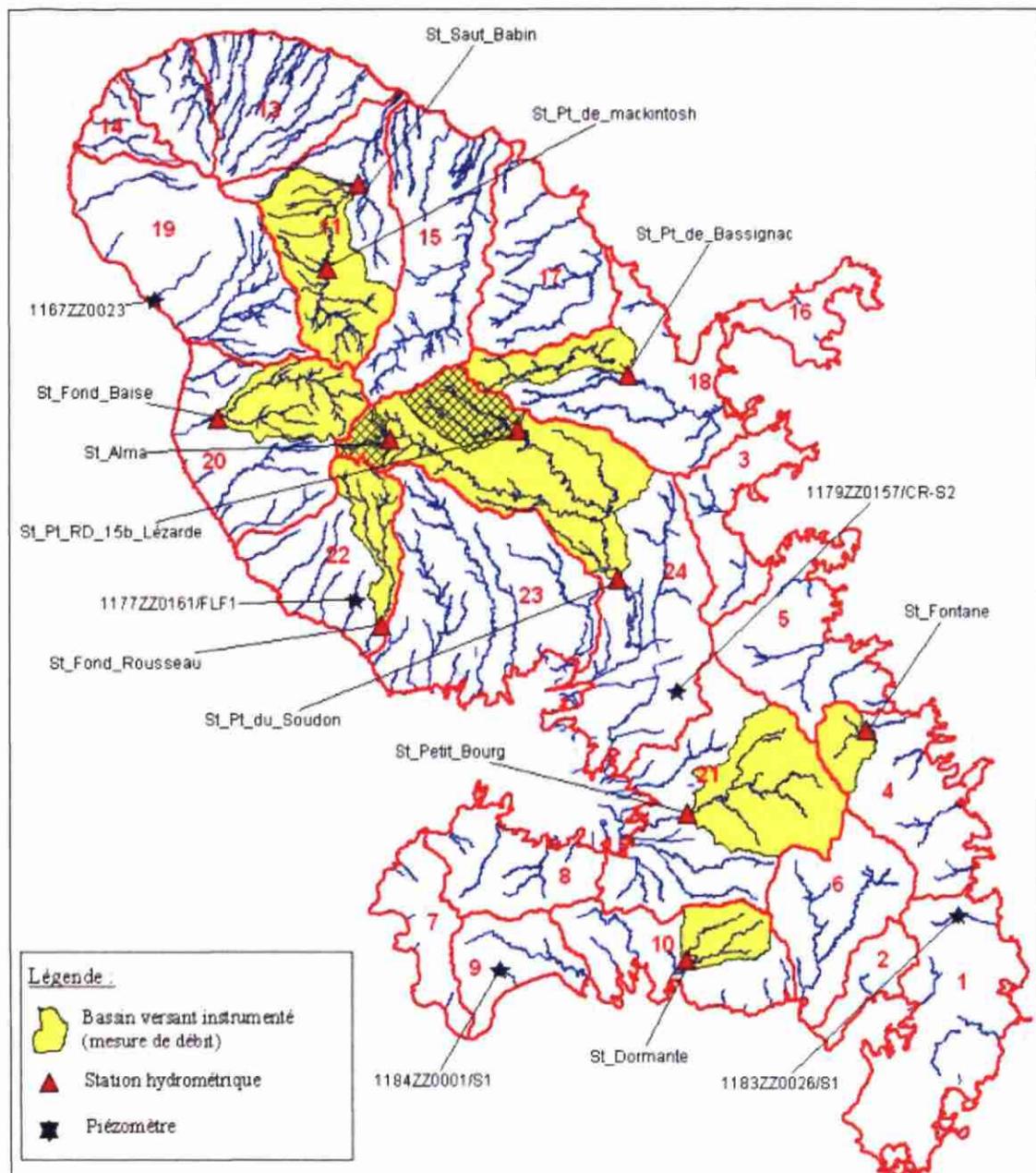


Illustration 68 : Localisation des points de mesures exploitables (hydrométrie et piézométrie)

Principe du calage

En absence de donnees experimentales suffisantes, il est tout a fait inutile d'envisager un calage automatique en suivant une procedure d'optimisation des parametres. On peut au mieux regler les differents parametres du simulateur de facon a ce que les resultats calcules (piezometrie et debits a l'exutoire) soient les plus proches possibles des donnees experimentales. On s'attache en particulier a reproduire les dynamiques (decrues des cours d'eau et tarissement des nappes) et a ne pas surestimer le stock dans la nappe (dont l'evaluation est le principal objectif de cette etude). En contrepartie, on accepte que les debits d'etiage soient sous-estimes.

La recherche du meilleur reglage se fait par essais successifs. Elle necessite de nombreuses simulations. Ce travail est ici facilite par le fait que le modele qui a ete propose ne comprend que quatre parametres (par UR). Notons toutefois que, en l'absence de chroniques de mesures de piezometrie et de debit systematiques et suffisamment longues, le modele propose pour simuler le comportement de chaque UR est peu contraint. **La solution n'est donc pas unique, et plusieurs jeux de parametres peuvent permettre de reproduire de maniere satisfaisante les donnees observees.**

Jeu de parametres cale

Lors des premieres simulations realisees pour le calage, il est rapidement apparu que les valeurs des coefficients de ruissellement devaient etre elevees pour que le modele ne sous-estime pas les debits en hautes eaux, et ne surestime pas le stockage d'eau dans les nappes.

Les UR ont ete classees selon leur permeabilite estimees a dire d'expert : UR13 tres permeable, UR19 permeables sur une grande partie de leur surface, UR9 et UR11 permeable sur environ 1/3 de leur surface, et toutes les autres UR peu permeables. On a donc impose 4 valeurs distinctes croissantes pour *coeff_sol* (contribution du sol et du sous-sol au coefficient de ruissellement). Les meilleurs resultats ont ete obtenus avec $A=1.1$ et les valeurs suivantes pour *coeff_sol* :

UH	Coeff_sol
UR13	0.6
UR9 et UR19	0.8
UR11	0.6
Toutes les autres UR	1

La cartographie des valeurs finales du coefficient de ruissellement est presentee sur l'illustration 69.

Le temps de transit dans le reservoir intermediaire a ete augmente pour 4 des 7 UR pour lesquelles on a pu comparer les debits specifiques mesures et calcules. Il n'est

pas exclu qu'il soit également supérieur à 1 jour (valeur par défaut) dans d'autres UR (23, 17 et 15 notamment), mais en l'absence de mesures de débit rien ne permet de confirmer cette hypothèse.

Les valeurs par défaut affectées à τ_2 sont satisfaisantes pour la plupart des UR. Le temps de transit dans la nappe a été modifié (augmenté) uniquement pour les UR 1 et 9. Des quatre paramètres de calage du modèle, τ_2 est certainement celui dont l'influence sur les résultats simulés est la plus faible.

Enfin, le coefficient de fuite en mer a été augmenté pour 3 UR (9, 19 et 22) sur la base des comparaisons entre piézométrie simulée et mesurée.

Le jeu de paramètres retenu est présenté dans l'illustration 70. Pour τ_1 , β et τ_2 , les valeurs en gras sont celles qui ont été modifiées par rapport aux valeurs par défaut. Le coefficient de ruissellement moyen à l'échelle de chaque UR qui résulte de ce calage est également indiqué.

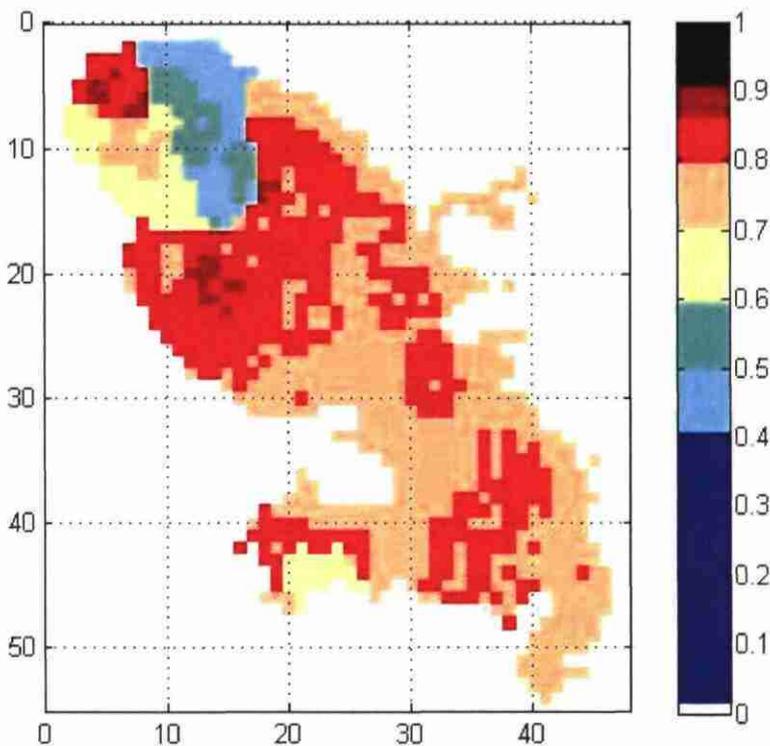


Illustration 69 : Carte des coefficients de ruissellement

	α moyen ¹³	β	$1/\tau_1$ (j)	$1/\tau_2$ (j)
UR1	78,7%	62%	1	50
UR2	79,8%	73%	1	20
UR3	80,0%	47%	1	20
UR4	79,7%	31%	1	20
UR5	79,0%	32%	1	20
UR6	80,1%	6%	1	50
UR7	81,7%	77%	1	20
UR8	80,4%	33%	1	20
UR9	64,6%	50%	1	91
UR10	79,6%	27%	1	20
UR11	51,4%	1%	1	91
UR12	85,8%	15%	1	91
UR13	51,4%	12%	1	91
UR14	85,3%	26%	1	91
UR15	81,5%	7%	1	91
UR16	78,7%	0%	1	20
UR17	80,3%	15%	1	91
UR18	79,6%	15%	3.3	91
UR19	70,0%	50%	1	91
UR20	83,9%	13%	2	30
UR21	79,4%	7%	1	50
UR22	83,0%	30%	1.4	30
UR23	79,3%	11%	1	30
UR24	80,4%	4%	2	91

Illustration 70 : Jeu de paramètres calé

¹³ Moyenne des coefficients de ruissellement de toutes les mailles qui appartiennent à une même UR.

Comparaison des debits specifiques mesures et simules

Sont presentes ci-dessous quelques resultats de la simulation realisee sur la periode 1986-1997¹⁴ avec le jeu de parametres obtenu lors du calage.

Ainsi, on a represente (Illustration 71) l'evolution au cours de l'annee hydrologique 1988-1989 des debits specifiques simules et observes de certaines UR (parmi celles equipees d'une station hydrometrique). On a egalement represente l'evolution du niveau d'eau dans la nappe de l'UR24 pour laquelle on dispose de mesures assez regulieres¹⁵.

Le niveau d'eau est calcule a partir du volume d'eau simule en introduisant une « porosite efficace » de 7% pour l'UR1, 10% pour les UR22 et 24, et 20% et 24% pour les UR9 et 19 reputees plus permeables. Ces valeurs, qui peuvent paraître particulierement elevees en contexte volcanique, s'apparentent en fait a une porosite equivalente. C'est une grandeur macroscopique, egale au rapport des vides (porosite, fissures, fractures...) situes dans la zone de battement annuel de la nappe, sur le volume total de l'UR. Compte tenu de la faible profondeur des nappes en general en Martinique, ces « vides » incluent principalement les terrains les plus superficiels (sols, formations superficielles, partie superieure des aquiferes, etc.) qui presentent a priori une porosite efficace plus elevee que les formations volcaniques sous-jacentes.

Des resultats supplementaires sont presentes en Annexe 7 et en Annexe 8.

De facon generale, on constate que le modele, bien qu'il repose sur une approche globale, permet de reproduire de maniere acceptable les debits aux exutoires. La dynamique des crues et decrues est correctement simulee. Concernant la piezometrie, les resultats paraissent moins satisfaisants, meme si, compte tenu de la nature discontinue et heterogene de la plupart des aquiferes, il est tres difficile d'associer les resultats obtenus a l'echelle d'une UR aux observations realisees sur un piezometre de cette unite.

A quelques exceptions pres (UR11, 13, 9 et 19) le ruissellement est tres important dans la plupart des bassins. Cette contrainte imposee pour reproduire au mieux les debits de hautes eaux et les niveaux piezometriques (avec une porosite efficace realiste) entraine une sous-estimation des debits a l'etiage (soutien par les nappes probablement sous-estime). Cette difficulte du modele est principalement liee au calcul de la repartition ruissellement/infiltration qui a ete supposee constante. Or en realite, on constate que ce n'est pas le cas, puisque ce ratio varie, notamment en fonction de

¹⁴ La premiere annee (1986) sert d'initialisation pour les reservoirs intermediaires et nappe du modele, c'est pourquoi on n'en exploite pas les resultats .

¹⁵ Piezometre 1179ZZ0157 de Bois Rouge (Lamentin). Ce piezometre etant debordant, les valeurs elevees sont ecretees.

l'etat de saturation du sol. Ainsi, lors des forts evenements pluvieux, ou en hivernage prononce, la part d'eau ruisselée peut être notablement plus élevée qu'en periode de faible pluviométrie (carême). Ceci explique les difficultés qui ont été rencontrées pour caler le modele lors des crues : les valeurs des pics sont la plupart du temps sous-estimées, ce qui signifie qu'en periode de fortes pluies le modele actuel sous-estime le ruissellement. Pour améliorer ce point, on suggère de diminuer les valeurs du coefficient de ruissellement et d'introduire un seuil de pluie efficace au-delà duquel il n'y a pas d'infiltration. De cette façon, le volume moyen annuel infiltré simulé serait sans doute peu augmenté (puisque les épisodes pluvieux les plus importants ne contribueraient pas à la recharge) alors que le niveau des nappes calculé en basses eaux permettraient un soutien d'étiage plus efficace et donc plus proche de la réalité.

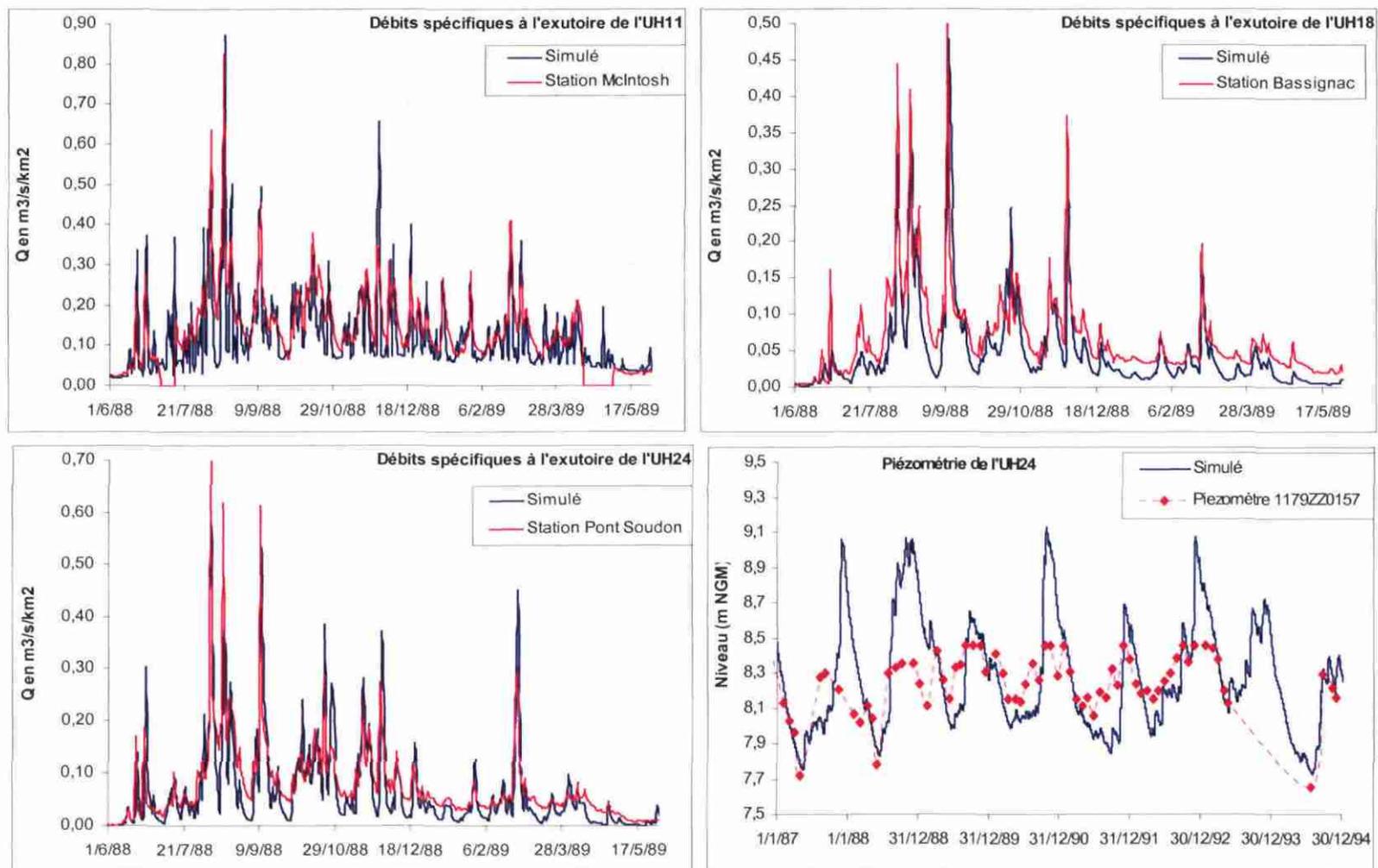


Illustration 71 : Comparaison simulation – observation (UR11, 18 et 24)

5.5. RESULTATS : EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU

5.5.1. Pluie efficace

La pluie efficace a été calculée (avec le modèle à trois réservoirs) à un pas de temps journalier en chaque maille de 1 km² sur la période 1986 - 1997. Sur cette période, la valeur moyenne annuelle à l'échelle de l'île est de **1189 mm**¹⁶. On présente ci-dessous (Illustration 72) la carte de la pluie efficace moyenne annuelle sur cette période, obtenue à partir des valeurs moyennes calculées en chaque maille de 1 km².

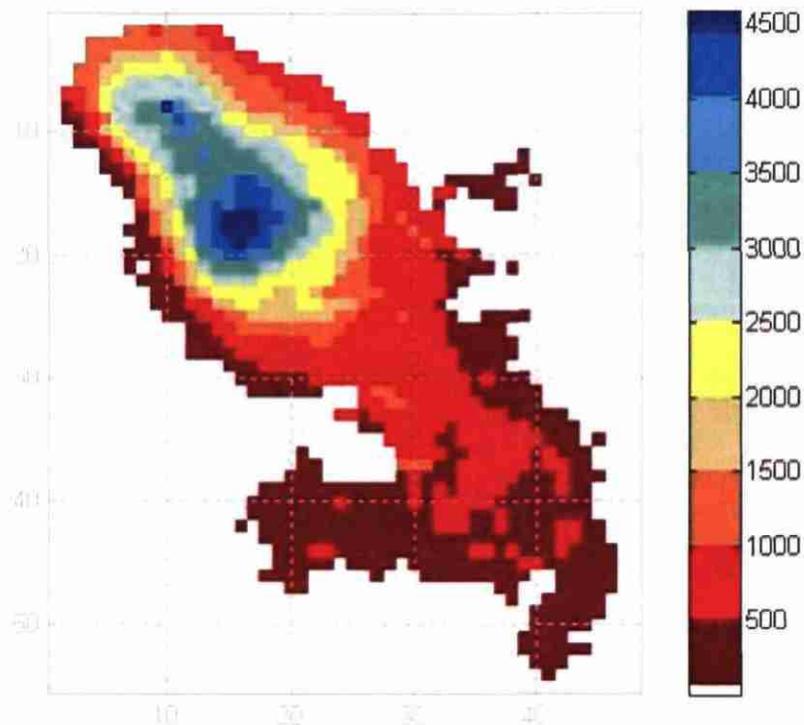


Illustration 72 : Carte de la pluie efficace moyenne annuelle (en mm)

Un second post-traitement a consisté à extraire de la matrice des résultats¹⁷ les chroniques de certaines mailles réparties sur l'île afin de fournir une vision de l'évolution spatiale et temporelle de la pluie efficace. Ainsi, les cumuls annuels ont pu

¹⁶ Valeur très proche de la valeur de 1217 mm estimée par la DIREN.

¹⁷ Matrice de dimension 55*48*nombre_de_pas_de_temps

être calculés à l'endroit de chacun des 13 pluviomètres de référence (pour la zone 5 dépourvue de station de mesure, la pluie efficace annuelle a été calculée en un point central). Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant (Illustration 73). On trouvera en Annexe 5 les graphes correspondants (ainsi que les coordonnées des mailles).

Année	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
1986	1742	451	444	153	296	182	316
1987	1989	1141	678	346	508	329	624
1988	2536	1266	1128	422	593	253	829
1989	1928	931	517	77	168	631	340
1990	2399	2003	819	642	842	460	811
1991	2011	1027	301	160	228	631	287
1992	2091	1169	697	387	562	171	442
1993	2554	1955	869	254	405	607	569
1994	1161	721	324	57	118	279	186
1995	2141	1684	1178	741	988	140	510
1996	2274	1362	619	252	371	746	195
1997	1848	1473	484	184	294	230	296
Année	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14
1986	322	1959	3101	3479	3832	807	3319
1987	790	2112	3282	2982	4022	985	2384
1988	983	2747	4033	4385	4667	1369	4193
1989	573	2470	3483	4043	4546	1441	3546
1990	904	2683	3950	4597	5173	1726	4508
1991	398	2030	3347	3319	3948	1015	3241
1992	733	2413	3548	3613	4631	967	3070
1993	912	2888	4102	3895	6048	1661	3365
1994	298	1652	2771	2713	4133	594	2321
1995	1132	2622	3653	2845	4207	1246	2896
1996	681	2014	3436	3145	4380	1194	3092
1997	566	1994	3765	3678	5025	1218	3200

Illustration 73 : Pluie efficace annuelle (en mm) calculée au niveau des pluviomètres de référence

5.5.2. Bilans par Unité Régionale

Le simulateur numérique basé sur un modèle de trois réservoirs en cascade permet d'évaluer le bilan hydrologique moyen de la Martinique. Ainsi, à partir des résultats de la simulation effectuée sur la période 1987-1997, on peut connaître la répartition des flux d'eau à l'échelle de chaque Unité Hydrologique. Les résultats obtenus sont présentés dans l'illustration 74¹⁸. Les variations de stocks (zone non saturée et nappe) qui complètent ces bilans et représentent de 1 à 10% de la pluie efficace selon les UR ne sont pas reportées dans ce tableau (car elles ne représentent pas une valeur moyenne mais une différence d'état hydrologique entre la première et la dernière année de simulation).

¹⁸ Volumes cumulés sur la période 1987-1997, divisés par 11 pour obtenir une valeur moyenne annuelle.

		Valeurs annuelles moyennes (période 1987-1997)							Pour info	
		Surface (km2)	Volume pluie efficace (m3)	Infiltration (m3)	Ruissellement (m3)	Volume des fuites en mer (m3)	Volume écoulé à l'exutoire	Prélèvements (m3)	Pluie efficace moyenne annuelle (mm)	Débit moyen annuel (m3/s)
UH1	Sainte Anne	60	1,83E+07	3,90E+06	1,44E+07	2,44E+06	1,59E+07	-	305	0,50
UH2	Marin	10	4,73E+06	9,54E+05	3,78E+06	7,00E+05	4,03E+06	-	473	0,13
UH3	Robert	25	1,23E+07	2,40E+06	9,87E+06	1,13E+06	1,11E+07	-	491	0,35
UH4	Vauclin	44	2,01E+07	4,01E+06	1,61E+07	1,25E+06	1,88E+07	-	456	0,60
UH5	François	44	1,72E+07	3,57E+06	1,36E+07	1,15E+06	1,61E+07	-	390	0,51
UH6	Rivière Pilote	40	1,95E+07	3,87E+06	1,56E+07	2,36E+05	1,93E+07	-	488	0,61
UH7	Anses d'Arlets	18	3,88E+06	6,99E+05	3,18E+06	5,39E+05	3,34E+06	-	216	0,11
UH8	Trois Ilets	32	1,24E+07	2,43E+06	9,99E+06	8,01E+05	1,16E+07	-	388	0,37
UH9	Diamant	21	7,27E+06	2,57E+06	4,70E+06	1,30E+06	6,00E+06	-	346	0,19
UH10	Sainte Luce	43	1,91E+07	3,88E+06	1,52E+07	1,05E+06	1,80E+07	-	444	0,57
UH11	Champflore / Capot	58	1,76E+08	8,48E+07	9,10E+07	8,54E+05	1,62E+08	1,32E+07	3033	5,15
UH12	Conil Nord	17	3,34E+07	4,56E+06	2,88E+07	6,86E+05	3,27E+07	-	1965	1,04
UH13	Pelée Nord	39	6,72E+07	3,17E+07	3,55E+07	3,81E+06	6,35E+07	1,13E+05	1724	2,01
UH14	Conil Sud	9	1,54E+07	2,29E+06	1,31E+07	5,95E+05	1,48E+07	-	1708	0,47
UH15	Lorrain - Marigot	57	1,33E+08	2,32E+07	1,10E+08	1,64E+06	1,30E+08	1,75E+06	2333	4,11
UH16	Caravelle	17	4,97E+06	1,06E+06	3,91E+06	0,00E+00	4,98E+06	-	292	0,16
UH17	Sainte Marie	45	7,46E+07	1,44E+07	6,02E+07	2,14E+06	7,23E+07	-	1657	2,29
UH18	Galion	61	7,60E+07	1,51E+07	6,09E+07	2,27E+06	7,38E+07	-	1247	2,34
UH19	Pelée Ouest	69	1,38E+08	4,07E+07	9,72E+07	2,02E+07	1,15E+08	2,53E+06	2000	3,66
UH20	Carbet	59	9,82E+07	1,48E+07	8,34E+07	1,93E+06	9,62E+07	1,23E+05	1665	3,05
UH21	Petit Bourg	84	6,01E+07	1,23E+07	4,79E+07	8,69E+05	5,94E+07	-	716	1,88
UH22	Schoelcher - Case Pilote	40	4,44E+07	7,02E+06	3,73E+07	2,12E+06	3,73E+07	5,03E+06	1109	1,18
UH23	Fort de France	76	7,96E+07	1,61E+07	6,35E+07	1,79E+06	7,39E+07	4,04E+06	1048	2,34
UH24	Lézarde	128	2,08E+08	3,89E+07	1,69E+08	1,57E+06	1,81E+08	2,60E+07	1625	5,74

Illustration 74 : Bilan hydrologique moyen 1987-1997 calculé pour chaque UR (hors stocks)



6. Evaluation de la ressource en eau souterraine potentiellement exploitable en Martinique

L'objectif de ce chapitre est de presenter la methodologie mise en oeuvre puis les resultats des simulations destinees a evaluer la ressource en eau souterraine potentiellement exploitable au sein des 24 unites regionales, et globalement. Il s'agit de la ressource potentielle theoriquement disponible telle qu'evaluee et calculee precedemment, ajustee aux contraintes d'exploitabilite telles que la productivite unitaire attendue des forages selon les formations (d'apres donnees existantes, sans autres investigations specifiques *in situ*), leur rayon d'influence, les impacts sur les ecoulements de surface et les milieux, les contraintes d'accès liees a la topographie, a l'occupation du sol, etc.

6.1. METHODOLOGIE

La methodologie mise en oeuvre comprend schematiquement les principales etapes suivantes, qui sont ensuite detaillees ci-dessous :

1. le nombre maximal de forages realisable au sein de chaque unite hydrogeologique regionale a ete defini en fonction des caracteristiques hydrogeologique de l'unite regionale concernee (notamment les debits attendus au sein des differentes UCA constitutives de chaque UR) et de criteres concernant les superficies reellement utiles pour la realisation de forages,
2. l'exploitabilite de ces forages a ensuite ete verifiee en fonction de la ressource en eau souterraine effectivement disponible et des impacts supposes de cette exploitation, deduite notamment du « modele integre » elabore et decrit precedemment. Le cas echant, le nombre reel de forages a ete ajusté.

6.1.1. Données d'entrées sur la ressource en eau

Les donnees d'entrees necessaires a la seconde phase de la methodologie sont issues du modele integre presente dans les chapitres precedents. Il s'agit notamment de la pluie efficace et de la repartition de la ressource en eau entre lame d'eau ruisselée (ecoulements rapides) ecoulée, et lame d'eau infiltrée (ecoulements ayant circule au sein des aquiferes).

Ont egalement ete consideres les parametres suivants (issus eux aussi du modele integre, a la description duquel on se reportera) : repartition du drainage des eaux souterraines entre les cours d'eau de l'unite hydrologique considerée et les ecoulements directs en mer, dans differentes configurations :

- avant tout captage des eaux souterraines,
- dans la situation actuelle (en étiage) : prélèvements d'eau de surface en étiage, captage de certaines sources,
- dans la situation qui prévaudrait si une exploitation supplémentaire des eaux souterraines était mise en œuvre (par forages ; cf. ci-dessous).

6.1.2. Définition de la surface maximale disponible pour la réalisation de forages au sein de chaque UR

Afin de déterminer le nombre maximal de forages pouvant être réalisés au sein de chaque unité hydrogéologique régionale (UR), il est nécessaire de connaître la surface disponible pour réaliser ces forages, car elle en constitue un facteur limitant.

Afin de définir cette surface disponible, la méthodologie suivante a été mise en œuvre au sein de chaque unité. Ont été identifiées et délimitées les aires :

- où la pente est inférieure à 20% (sur la base du MNT IGN au pas de 20 m (chaque pixel correspondant à un carré de 20 m de côté),
- situées à plus de 500 m du littoral.

A ces aires ont été rajoutés les terrains qui n'auraient pas déjà été sélectionnés ci-dessus et qui se situent à moins de 100 m de part et d'autre des cours d'eau. Les pixels ou ensembles de pixels de taille inférieure ou égale à 40 x 40 m ont ensuite été exclus.

Ce traitement a conduit à sélectionner les aires présentées au sein de l'illustration 75, qui représentent au total 433 km².

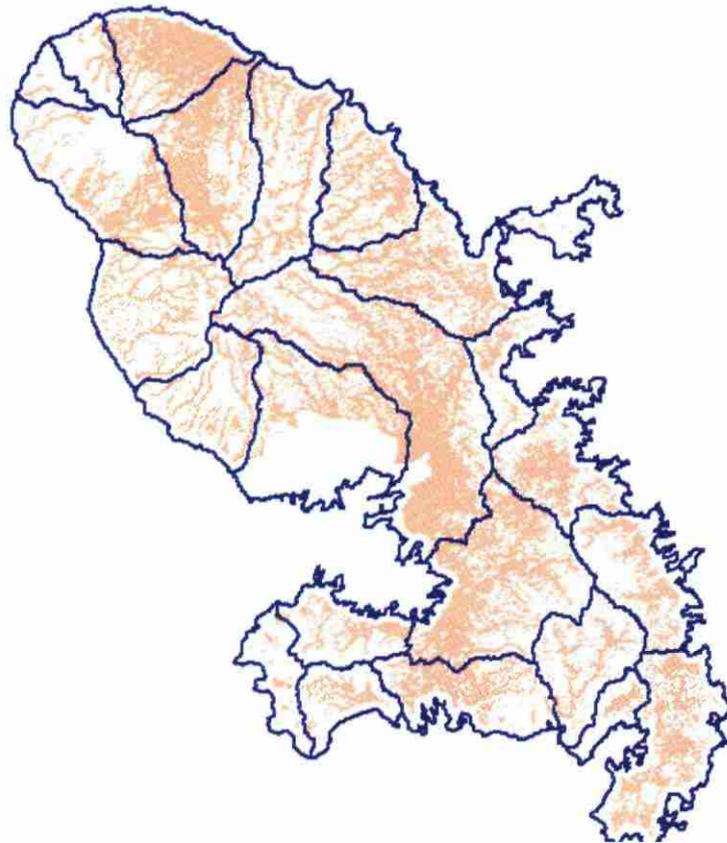


Illustration 75 : Aires disponibles pour la réalisation de forages eu sein des UR de Martinique

Un facteur de réduction de 30% a ensuite été affecté aux surfaces ainsi définies afin de s'affranchir notamment des surfaces encore considérées comme non accessible ou non favorables : par exemple les surfaces planes situées en haut des mornes ou des crêtes). L'aire résultante présente une surface de **303 km²**.

6.1.3. Croisement surface disponible / aquifère sous jacent

Au sein de chaque unité, un croisement a ensuite été effectué entre la surface disponible et les potentialités des formations aquifères sous jacentes afin de déterminer la superficie à rattacher à chacune des différentes formations aquifères (pour les différentes classes de débits identifiées).

Exemple : la surface disponible sur l'unité de Sainte-Anne est de 17,4 km². Sur ces 17,4 km², 8,2 km² correspondent à des UCA ayant un potentiel compris entre 5 et 10 m³/h, et 9,2 km² correspondent à des UCA ayant un potentiel compris entre 2 et 5 m³/h.

6.1.4. Définition du « rayon d'action » des forages et, sur cette base, du nombre maximal de forages réalisables au sein de chaque type d'aquifère

Pour estimer le nombre maximal de forages réalisables sur une surface donnée, une évaluation de l'aire d'influence des forages a été faite. Les aquifères de Martinique n'étant pas des milieux poreux, homogènes, isotropes, etc., cette évaluation sommaire s'est fondée sur des données expérimentales.

Les seules informations actuellement disponibles, en Martinique, sur le rayon d'action à « long terme » (après plusieurs mois de pompage) d'un forage sont celles recueillies dans le cadre des pompages d'essai de longue durée réalisés en 2006 et 2007 au sein de la Plaine du Lamentin. Les premières interprétations de ces essais montrent que le rayon d'action d'un pompage à 60 m³/h (20h/24) est d'environ 1 km, ce qui correspond à une aire d'environ 3,14 km².

Le rayon d'action R (m) peut aussi être exprimé de la manière suivante (de Marsily,

$$1986) : R = 1,5 \sqrt{\frac{T \cdot t}{S}}$$

Avec : T : transmissivité de l'aquifère (m²/s)

S : coefficient d'emmagasinement (sd)

t : temps depuis le début du pompage (s)

Par ailleurs, le débit de pompage peut grossièrement être considéré comme proportionnel à la transmissivité de l'aquifère (cf. équation de Theis par exemple, *in de Marsily, 1986*).

Ainsi, si l'on considère que le coefficient d'emmagasinement est un facteur peu variable devant la transmissivité, en première approximation le **rayon d'action R d'un forage évolue proportionnellement à la racine carrée de son débit.**

Sur cette base ont été estimées (Illustration 76) les surfaces correspondant aux rayons d'action des différentes classes de forages susceptibles d'être réalisés en Martinique (sur la base de la cartographie des débits potentiels instantanés par ouvrage, cf. chapitres 0 et 4.3.1) :

- classe de débit 30 à 60 m³/h : débit moyen d'un forage : 45 m³/h,
- classe de débit 10 à 30 m³/h : débit moyen d'un forage : 20 m³/h,
- classe de débit 5 à 10 m³/h : débit moyen d'un forage : 7.5 m³/h,
- classe de débit 2 à 5 m³/h : débit moyen d'un forage : 3.5 m³/h.

Q (m ³ /h)	60	45	20	7,5	3,5
R (m)	1000	866	577	354	242
Surface (km ²)	3,14	2,36	1,05	0,394	0,184

Illustration 76 – Rayon d'action à « long terme » et surface correspondante, pour les forages de Martinique, en fonction de leur débit d'exploitation (pompage 20h/24)

Exemple : pour l'unité de Sainte Anne, 8,2 km² correspondent à des UCA ayant un potentiel compris entre 5 et 10 m³/h. Si l'on considère un débit moyen par ouvrage de 7,5 m³/h, le rayon d'action d'un forage sera de 354 m et la surface correspondante de 0,394 km². **21 forages de 7,5 m³/h** pourraient donc ainsi y être réalisés en théorie (il n'est pas encore tenu compte, à ce stade, de la ressource disponible).

6.1.5. Adéquation entre nombre de forages et ressource en eau souterraine potentiellement exploitable

Les paragraphes précédents ont décrit la méthodologie mise en œuvre pour déterminer le nombre théorique maximal de forages réalisable sur chacune des unités régionales, en fonction des débits instantanés potentiellement exploitables (perméabilité des formations géologiques), mais sans tenir compte de la ressource réellement disponible (qui dépend, elle, notamment, de la quantité d'eau alimentant les aquifères).

Il s'agit donc à présent d'évaluer l'adéquation entre le nombre de forages réalisables et la ressource potentiellement exploitable.

Pour chacune unité hydrogéologique, la pluie efficace, ainsi que la part d'eau infiltrée vers les aquifères ont notamment été estimées.

Néanmoins, en général, il n'est pas envisageable de prélever par pompage au sein des aquifères 100 % de la recharge ainsi évaluée. En effet, la ressource en eau souterraine contribue à part entière au cycle de l'eau : les eaux ainsi infiltrées circulent au sein des aquifères puis s'écoulent en mer, émergent au niveau des sources ou des zones humides, sont drainées par les rivières, dont elles assurent le débit de base, notamment en étiage, etc. Ainsi, tout prélèvement d'eau souterraine aura un impact sur le milieu.

Par ailleurs, dans certaines configurations, le fait d'avoir destocké des eaux souterraines d'un aquifère en saison sèche peut conduire, lors de la saison des pluies suivante, à une recharge de celui-ci plus importante que celle qui se serait produite si ce déstockage n'avait pas été réalisé (en effet, l'aquifère aurait alors « débordé » plus rapidement et une part des précipitations efficaces aurait été rapidement évacuée par le réseau hydrographique vers la mer). Ce principe d'utilisation des aquifères, dénommé « **gestion active** », permet de « transformer » une partie du ruissellement rapide en recharge des aquifères et d'augmenter ainsi la ressource en eau exploitable en leur sein **par régularisation de la ressource**. Dans le cas d'aquifères se prêtant bien à la gestion active, la ressource exploitable peut dépasser la valeur de la recharge calculée lorsque l'aquifère n'est pas exploité.

Une méthodologie a été mise en œuvre afin d'évaluer ces impacts et les possibilités de gestion active et d'apprécier ainsi les volumes d'eau souterraine raisonnablement mobilisables au sein de chacune des unités hydrogéologiques. Elle est décrite ci-dessous étape par étape. La démarche retenue a consisté à représenter de manière simplifiée le cycle de l'eau.

Conséquences des pompages

Il a été considéré que les prélèvements par pompage se faisaient aux dépens :

- d'une diminution du débit d'alimentation des cours d'eau par les aquifères,
- d'une diminution du débit d'écoulement de la nappe vers la mer (fuites en mer),
- des variations de stock (diminution) au sein de la nappe, à compenser par une augmentation correspondante de la recharge au cours de la saison des pluies suivante (« gestion active »).

Il a été considéré en première approximation, pour l'ensemble des unités hydrogéologiques, que les pompages dans les futurs forages d'exploitation se faisaient :

- pour 10 % du débit pompé, aux dépens du débit des cours d'eau,
- pour 5 % du débit pompé, aux dépens des sorties en mer,
- pour 85 % des volumes pompés aux dépens du stock d'eau souterraine.

Ces différentes influences ont ensuite pu être ajustées pour chaque unité hydrogéologique en fonction du nombre de forages « proposé » et des connaissances disponibles sur le fonctionnement de l'unité considérée. L'« implantation » des forages a été réalisée ainsi de manière itérative en veillant à minimiser les impacts : par exemple, en n'implantant pas de forages à proximité immédiate du littoral dans des secteurs particulièrement vulnérables vis-à-vis du risque d'intrusion saline. A l'échelle régionale du travail, cette optimisation a été réalisée à « dire d'expert ». Des reconnaissances spécifiques (biseau salé, impact sur les cours d'eau, etc.) devraient être réalisées sur chaque site pour y implanter réellement et précisément des forages.

Pour chaque unité hydrologique, l'impact résultant des prélèvements par forages a été indiqué par un % quantifiant la diminution de l'alimentation des cours d'eau et des sorties en mer entre la situation actuelle et la situation avec les nouveaux forages proposés (colonnes 8 et 9 de Illustration 79). **De manière générale, le nombre et la localisation des forages proposés ont été limités de telle sorte que ces impacts n'excèdent pas 5 à 6 %,** sauf pour quelques cas particuliers qui sont justifiés ci-dessous. Ainsi, l'impact des prélèvements devrait être minime (en deçà de la précision des mesures...).

Il a aussi été estimé, en pourcentage (colonne 10 de Illustration 79), la part des écoulements rapides (ruissellement) qu'il est nécessaire de mobiliser pour assurer, en saison des pluies, la reconstitution du stock exploité en saison sèche (selon le principe évoqué plus haut de la « gestion active »). La cohérence de cette valeur avec les connaissances hydrogéologiques concernant l'unité concernée a été vérifiée au cas par cas.

6.1.6. Ressource maximale potentiellement exploitable

Sur la base du nombre de forages à débits considérés comme acceptables au sein de chaque unité hydrogéologique (cf. Illustration 79 et Illustration 87), la ressource maximale potentiellement exploitable a été estimée en considérant une exploitation 20 heures sur 24, et 365 jours par an (configuration maximale correspondant à l'AEP, mais pas à l'irrigation...).

6.2. RESULTATS

6.2.1. Ressource potentiellement exploitable par unité

Les tableaux (cf. pages 156, 157 et 158) et cartes (cf. pages 159 et 160) synthétisent les résultats des simulations pour chaque unité hydrogéologique. Ces informations sont compilées dans le SIG au sein de la couche « Unités Régionales ». La base de données associée à la couche des unités régionales contient ainsi les informations suivantes :

- Nom et numéro et Superficie (en km²) de l'Unité Régionale
- Pluie efficace (en mm)
- Part d'écoulement rapide (en % et en mm)
- Part d'eau infiltrée (en % et en mm)
- Part de l'eau infiltrée se vidangeant en rivière (en % et en mm)
- Part de l'eau infiltrée s'écoulant en mer (en % et en mm)
- Surface de l'unité utilisable pour la réalisation de forage (en % et en km²)
- Surface occupée par des formations potentiellement aquifère de niveau 1 pouvant fournir un débit par ouvrage de 45 m³/h, en km².
- Surface occupée par des formations potentiellement aquifère de niveau 1 pouvant fournir un débit par ouvrage de 20 m³/h, en km².
- Surface occupée par des formations potentiellement aquifère de niveau 1 pouvant fournir un débit par ouvrage de 7.5 m³/h, en km².
- Surface occupée par des formations potentiellement aquifère de niveau 1 pouvant fournir un débit par ouvrage de 3.5 m³/h, en km².
- Nombre de forage réalisable dans l'unité, pouvant fournir un débit par ouvrage de 45 m³/h.
- Nombre de forage réalisable dans l'unité, pouvant fournir un débit par ouvrage de 20 m³/h.
- Nombre de forage réalisable dans l'unité, pouvant fournir un débit par ouvrage de 7.5 m³/h.
- Nombre de forage réalisable dans l'unité, pouvant fournir un débit par ouvrage de 3.5 m³/h.
- Volume ainsi prélevé dans l'unité, en m³/j et en mm (sur la base d'une exploitation 20h/24)
- Impact sur les sorties en mer (% indiquant la diminution de ces sorties)
- Impact sur les sorties en rivières (% indiquant la diminution de ces sorties)
- Part de l'écoulement rapide nécessaire à la recharge de l'aquifère en saison des pluies (gestion active)

Unités régionales			Hydrologie								
nom	numéro	superficie	Peff	ER		I		Sorties en rivière		Sorties en mer	
		en km ²	en mm	en %	en mm	en %	en mm	en %	en mm	en %	en mm
Sainte Anne	1	60	305	79%	240	21%	65	38%	24.7	62%	40.3
Marin	2	10	473	80%	378	20%	95	27%	25.7	73%	69.3
Robert	3	25	491	80%	395	20%	96	53%	50.9	47%	45.1
Vauclin	4	44	456	80%	365	20%	91	69%	62.8	31%	28.2
François	5	44	390	79%	309	21%	81	68%	55.0	32%	26.0
Rivière Pilote	6	40	488	80%	391	20%	97	94%	91.0	6%	6.0
Anses d'Arlets	7	18	216	82%	177	18%	39	33%	12.9	67%	26.1
Trois îlets	8	32	388	80%	312	20%	76	77%	58.5	23%	17.5
Diamant	9	21	346	65%	224	35%	122	50%	61.0	50%	61.0
Sainte Luce	10	43	444	80%	354	20%	90	63%	56.7	37%	33.3
Rivière Capot	11	58	3033	52%	1571	48%	1462	99%	1447.4	1%	14.6
Conil Nord	12	17	1965	86%	1697	14%	268	85%	227.8	15%	40.2
Pelée Nord	13	39	1724	53%	912	47%	812	88%	714.6	12%	97.4
Conil Sud	14	9	1708	85%	1454	15%	254	74%	188.0	26%	66.0
Lorrain - Marigot	15	57	2333	83%	1925	17%	408	93%	379.4	7%	28.6
Caravelle	16	17	292	79%	230	21%	62	95%	58.9	5%	3.1
Sainte Marie	17	45	1657	81%	1338	19%	319	85%	271.2	15%	47.8
Galion	18	61	1247	80%	999	20%	248	85%	210.8	15%	37.2
Pelée Ouest	19	69	2000	70%	1409	30%	591	50%	295.5	50%	295.5
Carbet	20	59	1665	85%	1415	15%	250	77%	192.5	23%	57.5
Petit Bourg	21	84	716	80%	570	20%	146	93%	135.8	7%	10.2
Schoelcher CP	22	40	1109	84%	934	16%	175	70%	122.5	30%	52.5
Fort De France	23	76	1048	80%	836	20%	212	89%	188.7	11%	23.3
Lézarde	24	128	1625	81%	1321	19%	304	96%	291.8	4%	12.2

Illustration 77 : Résultats hydrologiques, par unité régionale (état actuel)

nom	Superficie pour les forages					
	Somme		SF 45 m3/h	SF 20 m3/h	SF 7.5 m3/h	SF 3.5 m3/h
	en %	en km ²				
Sainte Anne	29%	17.4	0	0	8.2	9.2
Marin	18%	1.8	0	0	1.8	0
Robert	17%	4.2	1.4	0	0	2.8
Vauclin	23%	10	0	0	0	10
François	30%	13	3.5	0	0	9.5
Rivière Pilote	20%	8	0	3	0	5
Anses d'Arlets	11%	2	0	1	1	0
Trois îlets	22%	7	0	7	0	0
Diamant	19%	4	0	1.8	2.2	0
Sainte Luce	30%	13	0	10	0.9	2.1
Rivière Capot	50%	28.8	20.3	7.7	0.8	0
Conil Nord	12%	2	0	2	0	0
Pelée Nord	56%	22	22	0	0	0
Conil Sud	6%	0.5	0	0.5	0	0
Lorrain - Marigot	6%	3.5	0	2.4	0	1.1
Caravelle	1%	0.2	0	0	0.2	0
Sainte Marie	33%	15	0	15	0	0
Galion	17%	10.6	8.6	0	0	2
Pelée Ouest	26%	18	18	0	0	0
Carbet	17%	10	10	0	0	0
Petit Bourg	44%	37	0	25	0	12
Schoelcher CP	23%	9	9	0	0	0
Fort De France	13%	10	5	5	0	0
Lézarde	45%	57	47	0	0	10

Illustration 78 : Surface utilisable pour la réalisation de forages, par unité régionale et pour les différentes classes de forages

nom	Nombre de forages réalisables à :				Volumes prélevés 20h/24, 365 jours par an		Impact étiage rivière en %	Impact Ec en Mer en %	Part sup sur Er (gestion active) en %
	45 m3/h	20 m3/h	7.5 m3/h	3.5 m3/h	en mm	en m3/j			
	Sainte Anne	0	0	5	15	11			
Marin	0	0	3	0	16	450	6%	1%	4%
Robert	0	1	0	15	21	1450	4%	2%	5%
Vauclin	0	0	0	45	26	3150	4%	5%	5%
François	0	2	0	33	26	3110	5%	5%	7%
Rivière Pilote	0	2	2	20	23	2500	3%	20%	5%
Anses d'Arlets	0	0	2	0	6.1	300	7%	2%	4%
Trois îlets	0	5	0	0	23	2000	4%	7%	6%
Diamant	0	2	6	0	30	1700	5%	2%	11%
Sainte Luce	0	5	5	8	28	3310	5%	4%	7%
Rivière Capot	6	7	2	0	53	8500	1%	18%	3%
Conil Nord	0	2	0	0	17	800	1%	2%	1%
Pelée Nord	9	2	0	0	83	8900	1%	4%	8%
Conil Sud	0	1	0	0	16	400	1%	1%	1%
Lorrain - Marigot	0	6	0	6	18	2820	1%	3%	1%
Caravelle	0	0	0	2	3	140	1%	5%	1%
Sainte Marie	0	7	0	0	23	2800	1%	2%	1%
Galion	5	0	0	11	31	5270	1%	4%	3%
Pelée Ouest	8	0	0	0	38	7200	1%	1%	2%
Carbet	4	3	0	0	30	4800	2%	3%	2%
Petit Bourg	0	10	0	10	20	4700	1%	10%	3%
Schoelcher CP	5	2	0	0	48	5300	4%	5%	4%
Fort De France	2	2	0	0	12	2600	1%	3%	1%
Lézarde	9	0	0	10	25	8800	3%	10%	2%

Illustration 79 : Nombre de forages potentiellement réalisables, volumes prélevés et impacts, par unité régionale

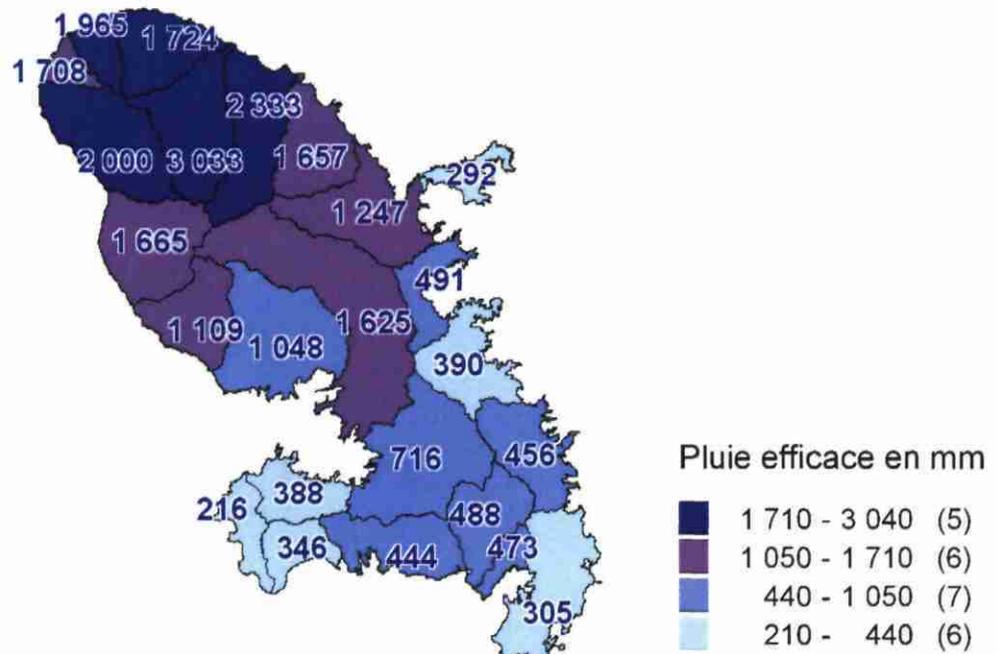


Illustration 80 : Variabilité spatiale de la pluie efficace par unité régionale

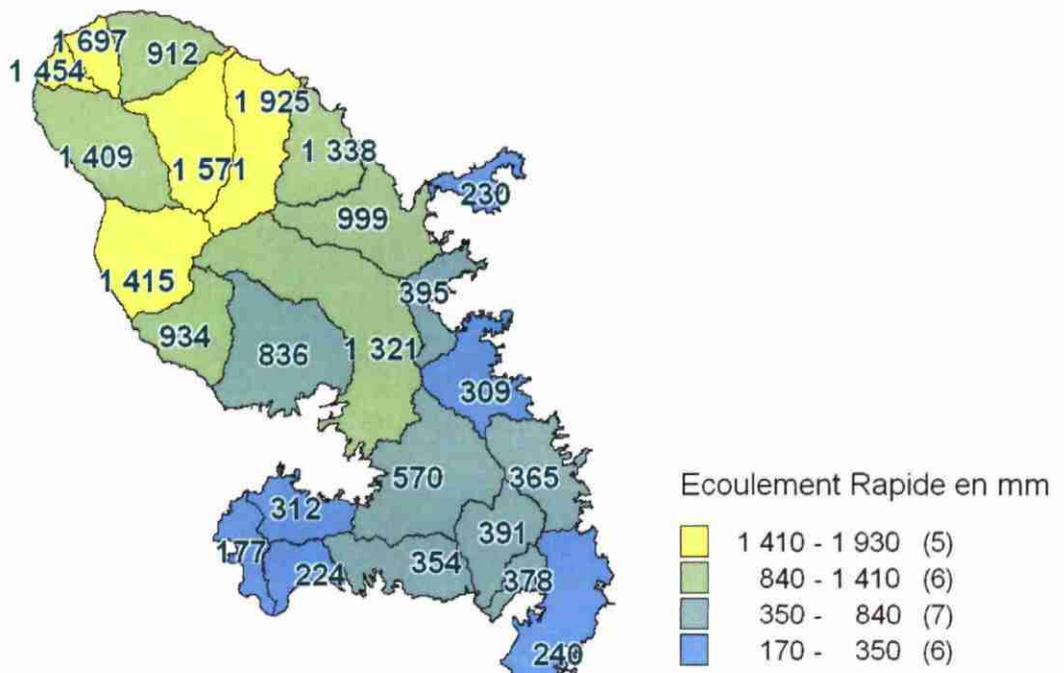


Illustration 81 : Variabilité spatiale de l'écoulement rapide, par unité régionale

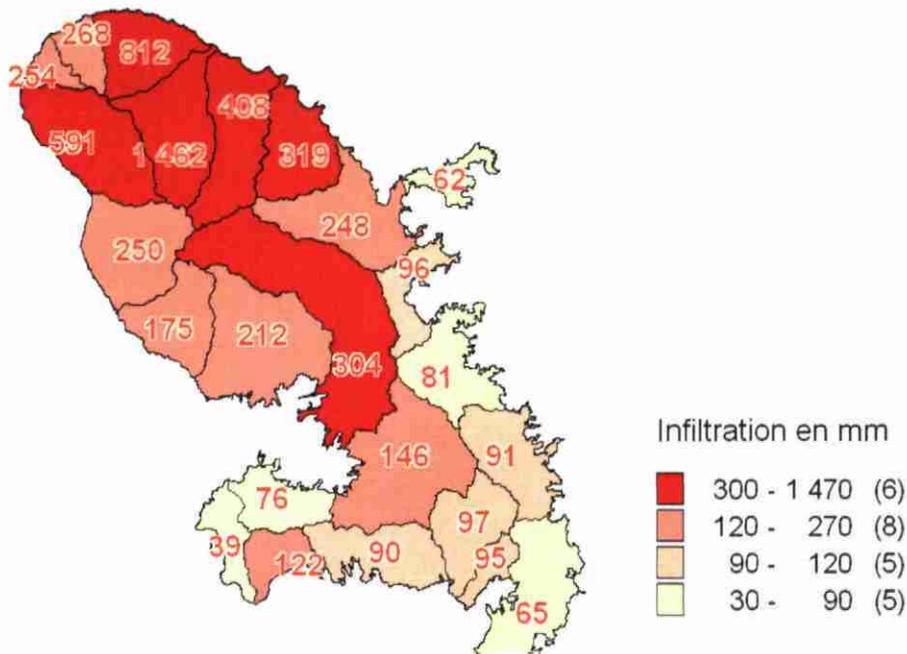


Illustration 82 : Variabilité spatiale de l'infiltration, par unité régionale

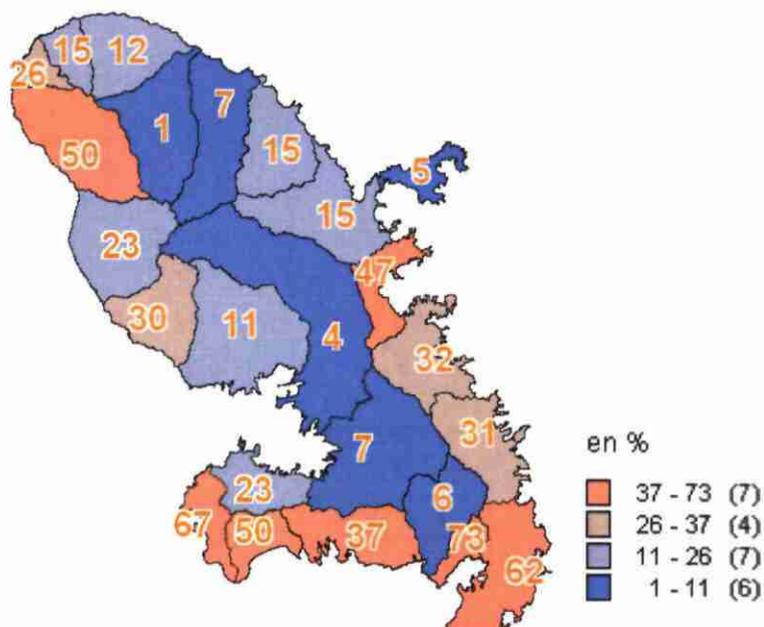


Illustration 83 : Pourcentage de l'eau infiltrée s'écoulant directement en mer

Les résultats présentés au sein des illustrations (cf. pages précédentes) sont issus de la méthodologie présentée dans les chapitres ci-dessus. L'attention est attirée sur les principaux points suivants :

Sorties en rivières

- ◆ Au sein de l'**unité du Marin**, l'impact des prélèvements sur les sorties en rivières est de 6%. Le principal secteur aquifère de cette unité correspond à la zone de Grand Fond au Marin qui ne comprend pas de rivière pérenne (la rivière de Grand Fond s'assèche pendant la saison sèche) ; l'impact d'une exploitation des eaux souterraines sur les eaux de surface devrait donc y être acceptable (légère diminution de la durée annuelle des écoulements au sein de la rivière). Si l'on souhaite néanmoins diminuer cet impact potentiel, il suffirait en théorie (selon la démarche adoptée ici) de ne réaliser que 2 forages à 7.5 m³/h au lieu de 3.
- ◆ Au sein de l'**unité des Anses d'Arlets**, l'impact des prélèvements sur les sorties en rivières est estimé à 7%. Comme pour l'unité du Marin, cet impact est jugé acceptable, compte tenu notamment du caractère non pérenne des cours d'eau de l'unité.

Sorties en mer

- ◆ Au sein de l'**unité de Rivière Pilote**, l'impact des prélèvements sur l'écoulement souterrain de la nappe vers la mer est de 20%. Ce pourcentage a priori élevé doit être rapproché des paramètres hydrologiques de cette unité. En effet, au sein de cette unité, 94% de l'eau infiltrée vers les nappes a comme exutoire une rivière, et seulement 6% de l'eau infiltrée s'écoule directement en mer. Ainsi, l'impact des prélèvements correspond à 20% de ces 6%, soit uniquement 1,2% de la part d'eau infiltrée. Une autre façon d'apprécier cet impact est de regarder les limites géographiques de cette unité et « la longueur » de sa façade maritime. On conceptualise ainsi facilement que des forages réalisés dans la partie amont de cette unité auront un impact très limité sur les écoulements des nappes d'eau souterraine au niveau de la mer.
- ◆ Au sein de l'**unité de la Rivière Capot**, l'impact des prélèvements sur l'écoulement souterrain de la nappe vers la mer est de 18%. Les explications sont les mêmes que pour l'unité de Rivière Pilote : l'impact des prélèvements correspond à 18% de 1% (écoulement à la mer de l'unité), soit uniquement 0,2% de la part d'eau infiltrée.
- ◆ Au sein de l'**unité de Petit Bourg**, l'impact des prélèvements sur l'écoulement souterrain de la nappe vers la mer est de 10%. Les explications sont les mêmes que pour les unités précédentes : l'impact des prélèvements correspond à 10% de 7% (écoulement à mer de l'unité), soit uniquement 0,7% de la part d'eau infiltrée.
- ◆ Au sein de l'**unité de la Lézarde**, l'impact des prélèvements sur l'écoulement souterrain de la nappe vers la mer est de 10%. Les explications sont toujours les mêmes que pour les unités précédentes : l'impact des prélèvements correspond à

10% de 4% (écoulement à la mer de l'unité), soit seulement 0,4% de la part d'eau infiltrée.

Gestion active

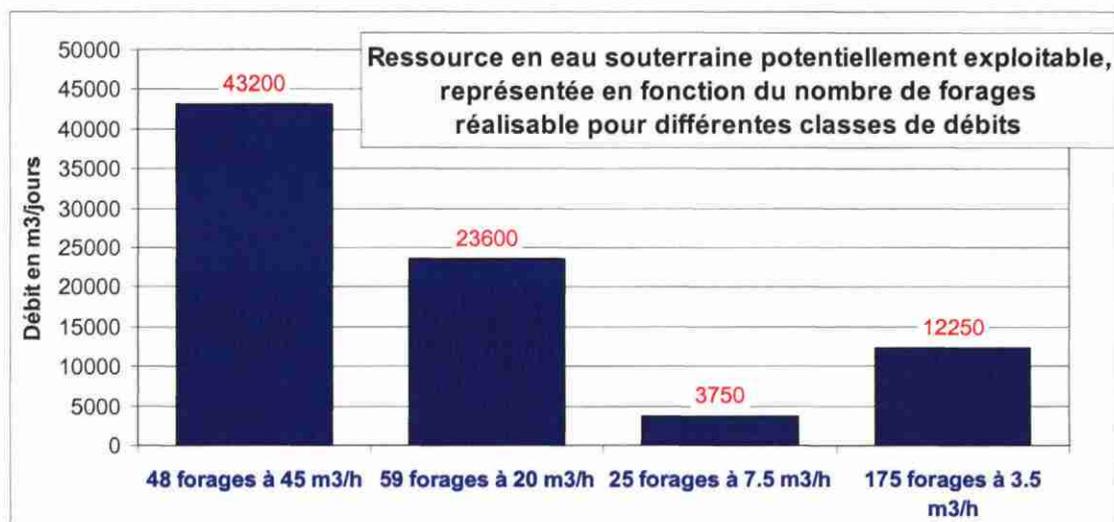
Trois unités présentent une part de gestion active légèrement supérieure aux autres unités. Ce pourcentage correspond à la part des écoulements rapides (ruissellement) qu'il est nécessaire de mobiliser (gestion active) pour assurer, en saison des pluies, la reconstitution du stock exploité en saison sèche. On a là aussi veillé à ce que cette valeur soit cohérente avec les connaissances hydrogéologiques sur l'unité concernée.

- ◆ Au sein de l'**unité du François**, la part de gestion active est de 7%. Cette part est acceptable ; néanmoins, si on souhaite la diminuer, on peut la ramener à 5% en diminuant le nombre de forage à 3,5 m³/h de 33 à 20.
- ◆ Au sein de l'**unité du Diamant**, la part de gestion active est de 11%. Cette valeur est cohérente avec la nature des formations géologiques constituant la majorité de cette unité : les ponces sont suffisamment perméables a priori pour permettre une telle réalimentation.
- ◆ Au sein de l'**unité Pelée Nord**, la part de gestion active est de 8%, cette valeur est la aussi cohérente avec la nature des formations géologiques constituant la majorité de cette unité : les nuées ardentes sont suffisamment perméables pour permettre une telle réalimentation.

6.2.2. Synthèse des ressources potentiellement exploitable sur l'ensemble de la Martinique

Les résultats issus de la simulation unité par unité ont été compilés au niveau de la Martinique afin de calculer le volume d'eau pouvant être prélevé sur l'ensemble de l'île. Il est estimé à 80 000 m³/j, soit 30 millions de mètre cubes par an.

Il correspond, en nombre de forages, à la répartition suivante selon leur productivité :



Si, pour renforcer le dispositif actuel d'Alimentation en Eau Potable, on considère comme techniquement intéressant uniquement les forages ayant des débits exploitables compris entre 20 et 45 m³/h, **une centaine de forages permettraient de fournir environ 66 000 m³/j.**

Les illustrations 84 et 85 présentent la répartition des volumes que l'on pourrait prélever, par unité et par secteur géographique, en ne considérant que ces deux classes de débits.

	Nombre Forages à :		Ressource potentielle en m ³ /j 20h/24, 365 jours par an
	45 m ³ /h	20 m ³ /h	
Sud	0	27	10 800
Centre	11	2	10 700
Nord Caraïbes	17	6	17 700
Nord Atlantique	20	24	27 600

Illustration 84 : Répartition des volumes prélevables par les classes de forages de 20 et 45 m³/h, selon les 4 grands secteurs géographiques de l'île

nom unité	Secteur géographique	Nombre de forages à :		Volumes prélevés 20h/24, 365 jours par an en m ³ /j
		45 m ³ /h	20 m ³ /h	
Sainte Anne	Sud	0	0	0
Marin	Sud	0	0	0
Robert	Sud	0	1	400
Vauclín	Sud	0	0	0
François	Sud	0	2	800
Rivière Pilote	Sud	0	2	800
Anses d'Arlets	Sud	0	0	0
Trois îlets	Sud	0	5	2 000
Diamant	Sud	0	2	800
Sainte Luce	Sud	0	5	2 000
Petit Bourg	Sud	0	10	4 000
Rivière Capot	Nord Atlantique	6	7	8 200
Conil Nord	Nord Atlantique	0	2	800
Pelée Nord	Nord Atlantique	9	2	8 900
Lorrain - Marigot	Nord Atlantique	0	6	2 400
Caravelle	Nord Atlantique	0	0	0
Sainte Marie	Nord Atlantique	0	7	2 800
Galion	Nord Atlantique	5	0	4 500
Pelée Ouest	Nord Caraïbes	8	0	7 200
Carbet	Nord Caraïbes	4	3	4 800
Conil Sud	Nord Caraïbes	0	1	400
Schoelcher CP	Nord Caraïbes	5	2	5 300
Fort De France	Centre	2	2	2 600
Lézarde	Centre	9	0	8 100

Illustration 85 : Calcul des volumes prélevables par unités, en ne comptabilisant que les forages prévisionnels de 45 et 20 m³/h

Ce projet a également permis de conceptualiser le « cycle de l'eau » en Martinique dans l'état actuel des connaissances (Illustration 86). Les légères différences avec les valeurs avancées plus haut correspondent notamment aux imprécisions induites par la discrétisation de la Martinique selon un maillage carré.

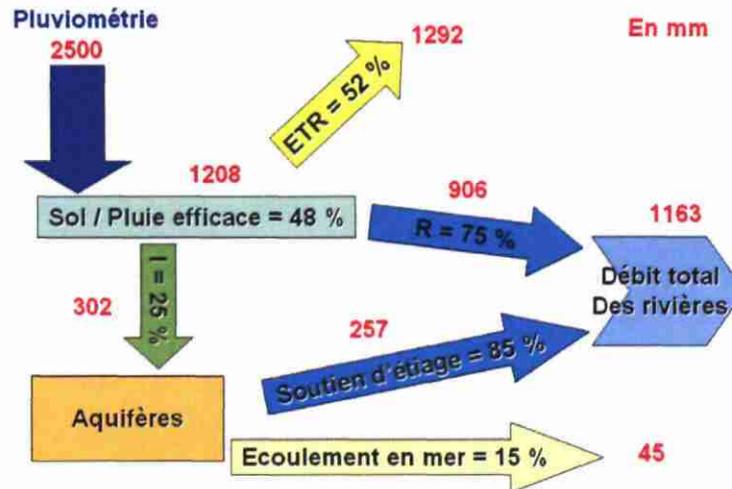


Illustration 86 : Conceptualisation du cycle de l'eau de la Martinique (état actuel)

Les prélèvements potentiels d'eau souterraine par de nouveaux forages correspondraient ainsi à 9% (28 mm, soit 30 Mm³/an) de la part d'eau infiltrée qui s'élève, elle, à 302 mm (soit 335 Mm³/an ou 2,3 % de la pluie efficace).

Parmi ces 28 mm, la part d'eau provenant de l'infiltration est de 13 mm (14 Mm³/an ou 4,3% de la part d'eau infiltrée), et la part régularisable par gestion active est de 15 mm (16 Mm³/an) ; ces 15 mm proviendraient d'une diminution de 1,6% du ruissellement rapide en période de saison des pluies.

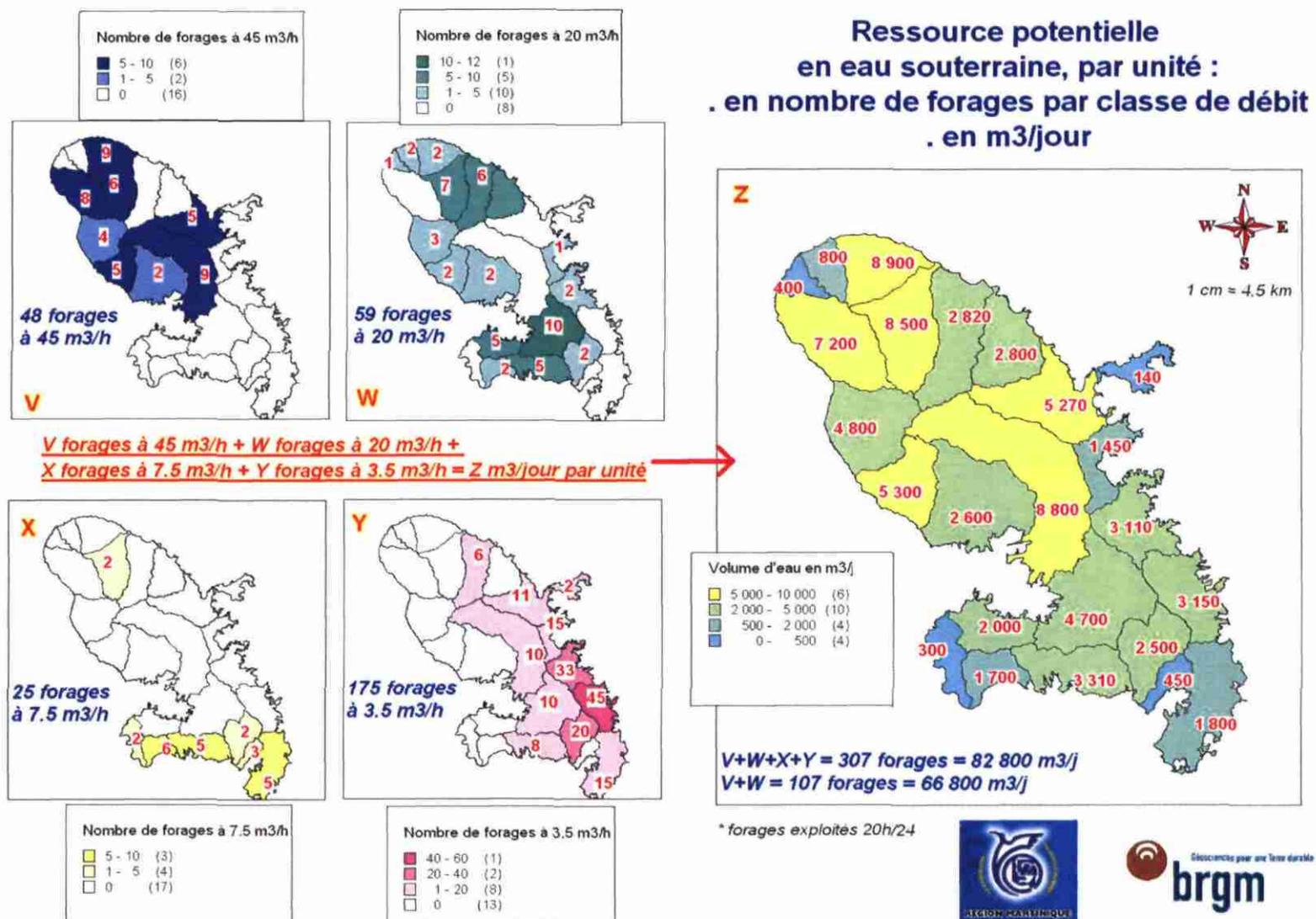


Illustration 87 : Répartition de la ressource en eau souterraine potentiellement exploitable par unité hydrogéologique

7. Architecture du SIG

L'ensemble des données résultantes de ce projet est synthétisé sous la forme de « couches d'informations », au sein d'un SIG dont la structure est la suivante :

Structure hydrogéologique :

- ◆ Unités constitutives d'aquifères de niveau 1 à 5 (avec base de données associée)
- ◆ Forages réinterprétés (avec base de données associée)
- ◆ Failles (selon la carte géologique)
- ◆ Surcharges structurales géologiques (selon la carte géologique)
- ◆ Altération anchi-métamorphique et hydrothermale (selon la carte géologique)

Exutoires et écoulements :

- ◆ Rivières permanentes
- ◆ Sources non thermales
- ◆ Sources thermales
- ◆ Cartes piézométriques existantes (Saint Pierre, Lamentin)

Alimentation :

- ◆ Pluie (grille avec maillage d'1km²)
- ◆ ETP (grille avec maillage d'1km²)
- ◆ ETR (grille avec maillage d'1km²)
- ◆ Pluie efficace (grille avec maillage d'1km²)

Evaluation de la ressource :

- ◆ Unités régionales, avec base de données associée et notamment ressource potentiellement exploitable en m³/jour, nombre de forages par classe de débits réalisable par unité.

Ces couches ont été créées aux formats .tab et .shp, et sont donc utilisable sous les SIG Arcview[®] et Mapinfo[®]. L'échelle de travail de cette étude étant le 1/50000^{ème}, ces données ne doivent pas être affichées avec un seuil de zoom supérieur.

8. Références bibliographiques

Akasako H. et al. (2002) - Conceptual models for geothermal systems in the Wolo Bobo, Nage and Mataloko fields, Bajawa area, central Flores, Indonesia; Indonesia-Japan geothermal exploration project in Flores Island. Chishitsu Chousa Kenkyuu Houkoku = *Bull. geol. Surv. Japan*, 53(2-3), p. 375-387.

Anonyme (2006) Projet Réseau SIG-Afrique. Vers une cartographie hydrogéologique de l'Afrique au 1/5M. Présentation d'une maquette au 1/10M et d'un exemple au 1/5M. Rapport BRGM/RP-54404-FR.

Andreieff P., Baudron J.C., Westercamp D. (1988) Histoire géologique e la Martinique, Petites Antilles. Bio-stratigraphie (foraminifères) et radiochronologie (potassium argon) *Géologie de la France*, n°2-3, pp 39-70.

Banks D., Odling N.E., Skarphagen H. et al. (1996) - Permeability and stress in crystalline rocks. *Terra Nova*, (8), p. 223-235.

Berard P., L.P., Seguin J.J., Sourisseau B. (1999) - Synthèse des connaissances sur la ressource thermique du Bas-Adour. Rapport BRGM R40539, BRGM.

Bodvarsson G.S., Benson S.M., Sigurdsson O. et al. (1984a) - The Krafla geothermal field, Iceland; 1, Analysis of well test data. *Wat. Res. Res.*, 20(11), p. 1515-1530.

Bodvarsson G.S., Pruess K., Stefansson V. et al. (1984b) - The Krafla geothermal field, Iceland; 2, The natural state of the system. *Wat. Res. Res.*, 20(11), p. 1531-1544.

Bodvarsson G.S., Pruess K., Stefansson V. et al. (1984c) - The Krafla geothermal field, Iceland; 3, The generating capacity of the field. *Wat. Res. Res.*, 20(11), p. 1545-1559.

Boeckh E. (1992) - An exploration strategy for higher yield boreholes in the West African crystalline basement. *In: E.P.a.B. Wright, E.G. (Editor), Hydrogeology of Crystalline Basement Aquifers in Africa. Geological Society Special Publication, London*, p. 87-100.

Boivin P., Livet M. (2001) - Les anneaux de tufs enfouis ; une nouvelle cible pour la recherche de ressources en eau en terrain volcanique ; l'exemple des captages de Vourzac (Deves, Massif central français). *Sciences de la Terre et des Planètes*, p. 761-767.

Bradford E. (1992) - Pressure changes in Rotorua geothermal aquifers, 1982-90; Rotorua geothermal field, New Zealand. *Geothermics*, 21(1-2), p. 231-248.

Brisson, A. (2003). Etude de la pluviométrie en Martinique - utilisation des mesures de précipitations.- *Les Cahiers du PRAM*, vol., 3, pp. 12-14

Burlet D. (1991) - Détermination du champ de contraintes régional à partir de tests hydrauliques en forage : résultats de 9 expérimentations *in-situ* réalisées en France. Ph-D Thesis, Université de Paris VII, Paris.

Comte J-P., Charguéron C., Lachassagne P. (2003) – Domaines hydrogéologiques et prédélimitation des masses d'eau souterraine de la Martinique. BRGM/RP 52688, 13 p., 5 annexes.

Cornet F.H., Burlet D. (1992) - Stress field determinations in France by hydraulic tests in boreholes. *J. Geophys. Res.*, 97(B8), p. 11829-11849.

Cruz J.V., Silva M.O. (2001) - Hydrogeologic framework of Pico Island, Azores, Portugal. *Hydrogeol. J.*, 9(2), p. 177-189.

Custodio E. (1975) - Hydrogeologia de las rocas volcanicas, 3rd UNESCO-ESA-IHA Symposium on Groundwater, p. 23-69.

Custodio E. (1978) - Geohidrologia de terrenos e islas volcanicas. Instituto de Hidrologia. Centro de Estudios Hidrographicos, Publ. 128, Madrid, 303 p.

Custodio E. (1985) - Hydrogeology of rocks of low permeability. *In: I.A.o. Hydrogeologists* (Editor).

Custodio E., Lopez Garcia L., Amigo E. (1988) - Simulation par modèle mathématique de l'île volcanique de Ténériffe (Canaries, Espagne). *Hydrogéologie*, 1988(2), p. 153-167.

d'Arcy D. et al. (1990) - Bassin hydrogéologique de Volvic. Prise en compte des risques de pollution par un tracé autoroutier. *In: D.G. Price* (Editor), Six International Congress. International Association of Engineering Geology. AA Balkema,, Amsterdam, Netherland, p. 1433-1437.

Davis S.N. (1974) - Change in porosity and permeability with geologic time. *Int. Sym. Hydrol. Volcanic Rocks, Lanzarote, Canary*, p. 96-97.

Desprats J.F., Comte J.P., Perian G. (2003) Cartographie par analyse multicritère des sols potentiellement pollués par organochlorés en Martinique. Rapport Phase 2. BRGM RP 52257JF Desprats, rapport RP52257.doc

Enilorac, M.P. (1986). Contribution à l'étude de l'évapotranspiration potentielle sous climat tropical humide et d'altitude.-, Ecole Supérieure d'Agronomie Tropicale, Montpellier.

Feuillet N., Manighetti I., Taponnier P. (2001) - Extension active perpendiculaire à la subduction dans l'arc des Petites Antilles (Guadeloupe, Antilles françaises). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 333, p. 583-590.

Folio J.L. (2001) - Distribution de la perméabilité dans le massif du Piton de la Fournaise : apport à la connaissance du fonctionnement hydrogéologique d'un volcan-bouclier. Université de la Réunion, 150 p.

Frissant N., Jaques E., Lachassagne P. (2007).- Etude des modalités d'exploitations du domaine d'altitude de l'Est de La Réunion. Rapport BRGM/RP-55327-FR. 54 p., 18 ill., 1 ann.

Guillen J.A. (1984) - Hydrogeological facts about dike aquifers and underground water circulation in Tahiti, C.S.C. workshop on water resources of small islands, June 27-July 9, 1984. Commonwealth Science Council Technical Publication, Suva, Fiji, p. 455-472.

Guillou-Frottier L. (2003) - Compilation et analyse des données thermiques sur le champ géothermique de Bouillante. Premières interprétations pour le fonctionnement du champ géothermique. BRGM/RP-52452-FR, BRGM.

Guiscafre, J., Klein J.C., Moniod F. (1976) Les ressources en eau de surface de la Martinique.- Monographies hydrologiques ORSTOM.

Huntoon P.W. (1986) - Incredible tale of Texasgulf well 7 and fracture permeability, Paradox Basin, Utah. *Groundwater*, 24(5), p. 643-653.

Ingebritsen S., Scholl M. (1993) - The hydrogeology of Kilauea volcano. *Geothermics*, 22, p. 255-270.

Izuka S.K., Gingerich S.B. (2003) - A thick lens of fresh groundwater in the southern Lihue Basin, Kauai, Hawaii, USA. *Hydrogeol. J.*, 11, p. 240-248.

Jackson D.B., Lenat J.F. (1989) - High-level water tables on hawaiian type volcanoes and intermediate depth geoelectric structures, Kilauea Volcano, Hawaii and Piton de la Fournaise Volcano, Isle de la Réunion. Bulletin - New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, p. 142.

Jawaheer K., Proag V. (1988) - Groundwater aquifers of Mauritius. *Hydrogéologie* (2), p. 125-134.

Join J.L. (1991) - Caractérisation hydrogéologique du milieu volcanique insulaire - Piton des neiges - Ile de la Réunion. Université de la Réunion, 179 p.

Join J.L., Coudray J. (1993) - Caractérisation géostructurale des émergences et typologie des nappes d'altitude en milieu volcanique insulaire (île de la Réunion). *Geodynamica Acta*, 6(4), p. 243-254.

Josnin J.Y. et al. (2002) - The role of unsaturated zone flow from strombolian cone on storage calculation for basaltic aquifers (a case study in Massif Central, France). EGS XXVII General Assembly, Nice, France.

Joux M. (2002) - Structure et fonctionnement hydrogéologique du système aquifère volcanique des eaux minérales de Volvic (Chaîne des Puys, Massif central français). Ph-D Thesis, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon, 227 p.

Keller G.V., Trowbridge G., Murray, J.C. et al. (1979) - Results of an experimental drilling hole at the summit of Kilauea volcano, Hawaii. *J. Volcanol. Geothermal Res.*(5), p. 345-385.

Lachassagne P. (2003).- Source Attila (Commune du Morne Vert, Martinique). Délimitation des périmètres de protection du captage et détermination des prescriptions associées.- SCCCNO, Conseil Général de la Martinique.- Rapport PL – AHAHP – 03 MTQ 03.

Lachassagne P. (2003).- Source Yang Ting (Commune de Fonds Saint Denis, Martinique). Délimitation des périmètres de protection du captage et détermination des prescriptions associées.- SCCCNO, Conseil Général de la Martinique.- Rapport PL – AHAHP – 04 MTQ 03.

Lachassagne P., Cruchet, M., Lebon D. (soumis) - Structure hydrogéologique des îles basaltiques anciennes : un modèle conceptuel distinct de ceux des îles récentes. Apport d'une campagne de forages de reconnaissance à Mayotte (Comores, France). Bulletin de la Société Géologique de France (soumis).

Lachassagne P., Maréchal J. (2004) - Synthèse des connaissances hydrogéologiques, profondes et de subsurface, sur le champ géothermique de Bouillante. BRGM/RP-53404-FR, BRGM, Montpellier.

Lachassagne P., Paulin C., Petit V. et al. (1992) - Recherche d'eau souterraine dans la plaine du Lamentin pour l'AEP de la ville de Fort de France. Première phase : faisabilité de l'exploitation des 5 forages de première tranche. Interprétation des pompages d'essai, estimation des interférences entre forages, de la ressource et de la qualité des eaux prélevées.- Mairie de Fort de France. R34870 ANT 4S 92, BRGM, Fort-de-france.

Lachassagne P., Pinault J.-L. (2001) - Radon-222 emanometry: a relevant methodology for water well siting in hard rock aquifer. *Water Res. Res.*, 37(12), p. 3131-3148.

Lachassagne P. et al. (2001) - Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *Groundwater*, 39(4), p. 568-581.

Macdonald G.A., Abbott A.T., Peterson F.L. (1983) - Volcanoes in the sea. The geology of Hawaii. University of Hawaii Press, Honolulu.

Margat J. (1978).- Nouvelle légende de carte géologique. Rapport BRGM 78 SGN 473 HYD.

Margat J. (1980).- Carte hydrogéologique de la France. Systèmes aquifères à 1/1 500 000.- Editions du BRGM, carte et notice explicative.

Margat J, Castany, (2000).- Dictionnaire Français d'hydrogéologie

Marsily G (1981) , Hydrogéologie quantitative, Ed Masson, Paris

- Massonat G.** (1994) - Les réservoirs fissurés : modélisation de structures et simulation d'écoulements. *Bull. Centre de Recherches Exploration-Production Elf Aquitaine*, 18(1), p. 135-314.
- Mobèche JP.** (2003) Homogénéisation et traitement des données pluviométriques de la Martinique par la méthode du vecteur régional. *Les Cahiers du PRAM*, octobre 2003, pp. 15-19.
- Nicholson K.** (1993) - Geothermal fluids. Chemistry and Exploration Techniques. Ed. Springer-Verlag, 262 p.
- Peterson F.L.** (1992) - Hydrogeology of volcanic oceanic islands. In: Sakura-Yasuo (Editor), 29th International Geological Congress (I.G.C.). Selected papers on Environmental Hydrogeology. Verlag Heinz Heise, Hanover, RFA, Kyoto, Japan, p. 163-171.
- Pinault J.L., Schomburgk S.** (2006) Inverse modeling for characterizing surface water/groundwater exchanges, *Water Resources Research*, Res.42, W08414 doi : 10.1029/2005WR004587
- Pinault J.L., Amraoui N., Golaz.C.** (2005) Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydrological system in the context of climate changes, *Water Resources Research*, Vol.41
- Pinault J.L., Doerfliger N., Ladouche B., Bakalowicz M.** (2004) Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach : The saline springs of Thau, southern France, *Water Resources Research*, 40 W08501
- Pinault J.L., Pauwels H., Cann.C.** (2001c) Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems - application to nitrate transport and denitrification., *Water Resources Research*, Vol. 37, n° 8, pp. 2179-2190
- Pinault J.L., Plagnes.V., Aquilina.L., Bakalowicz.M.** (2001b) Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems - Characterization of karst system functioning., *Water Resources Research*, Vol. 37, n° 8, p. 2191-2204
- Pinault J. L.** (2001a). Manuel Utilisateur de TEMPO logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. BRGM/RP-51459-FR
- Pruess K., Bodvarsson G.S., Stefansson V. et al.** (1984) - The Krafla geothermal field, Iceland; 4, History match and prediction of individual well. *Water Res. Res.*, 20(11), p. 1561-1584.
- Requieg** (1986) L'évapotranspiration et bilan hydrique en Martinique.- Rapport Météo France
- Sanjuan B.** (2001) - Champ géothermique de Bouillante (Guadeloupe): synthèse des travaux réalisés en géochimie avant 1999. BRGM/RC-51672-FR, BRGM.

Sanjuan B., Genter A., Brach M., Lebon D. (2001) - Compléments d'étude géothermique dans l'île de la Réunion (géologie, géochimie). Rapport BRGM/RP-51189-FR, 198 p.

Serra H., Sanjuan B. (2004) - Synthèse bibliographique des géothermomètres à gaz - Les gaz dans les sols en prospection géothermique. Rapport BRGM/RP-53132-FR.

Shettigar K.V. (1984) - Electrical resistivity investigation on the Schofield high level water body, Oahu, Hawaii. *In*: R.A. Binns (Editor), Geosciences in the development of natural resources. Geological Society of Australia, Sydney, Sydney, N.S.W., Australia, p. 479-481.

Stieltjes L., Gourgand B., Steenhoudt M. (1988) - Modes de circulation et de gisement de l'eau souterraine dans un volcan bouclier basaltique. Exemple de l'île de la Réunion, milieu océanique tropical. *Hydrogéologie*(2), p. 83-94.

Stieltjes L., Steenhoudt M., Gourgand B. et al. (1986) - Atlas hydrogéologique de la Réunion. 86REU30, BGRM, Département de la Réunion, Conseil Général de la Réunion, Ministère de l'Agriculture.

Tabasaki K.J., Mink J.F. (1983) - Volcano feeder dikes impound large reservoirs of ground water in the Hawaiian islands, International conference on groundwater and man. Australian Water Resources Council, Canberra, ACT, Australia, Sydney, p. 309-318.

Tamanyu S., Wood C.P. (2003) - Characterization of geothermal systems in volcano-tectonic depressions; Japan and New Zealand. Chishitsu Chousa Kenkyuu Houkoku = Bulletin of the Geological Survey of Japan, 54(3-4), p. 117-129.

Thiéry D. (2003) Logiciel GARDÉNIA, version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig., 3 ann.

Traineau H., Westercamp D., Benderitter Y. (1989) - Case study of a volcanic geothermal systems, Mount Pelee, Martinique; Mount Pelee. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 38(1-2), p. 49-66.

Violette S., Ledoux E., Goblet P. et al. (1997) - Hydrologic and thermal modeling of an active volcano: the Piton de la Fournaise, Réunion. *J. Hydrol.*, 191 (1997), p. 37-63.

Vittecoq B., Brugeron A., Lachassagne P., Mathieu F. (2007).- Localisation du biseau salé sur la nappe du Lamentin : apport de la méthode géophysique par panneau électrique. Rapport BRGM/RP-55554-FR

Westercamp D. et al. (1987) - Schéma hydrogéologique et géothermique d'un stratovolcan d'arc insulaire ; exemple de la montagne Pelée, Martinique (Antilles françaises). Hydrogeologic and geothermal scheme of an insular arc stratovolcano; Mount Pelee, Martinique, French Antilles; Bilan et perspectives de la recherche française en géothermie; Colloque. Bilan et perspectives de la recherche française en géothermie; Colloque, Orléans, France, June 12-13, 1985. Bulletin de la Société Géologique de France, Huitième Série, 3(6), p. 1063-1073.

ANNEXES

Annexe 1

Moyennes mensuelles de pluviometrie



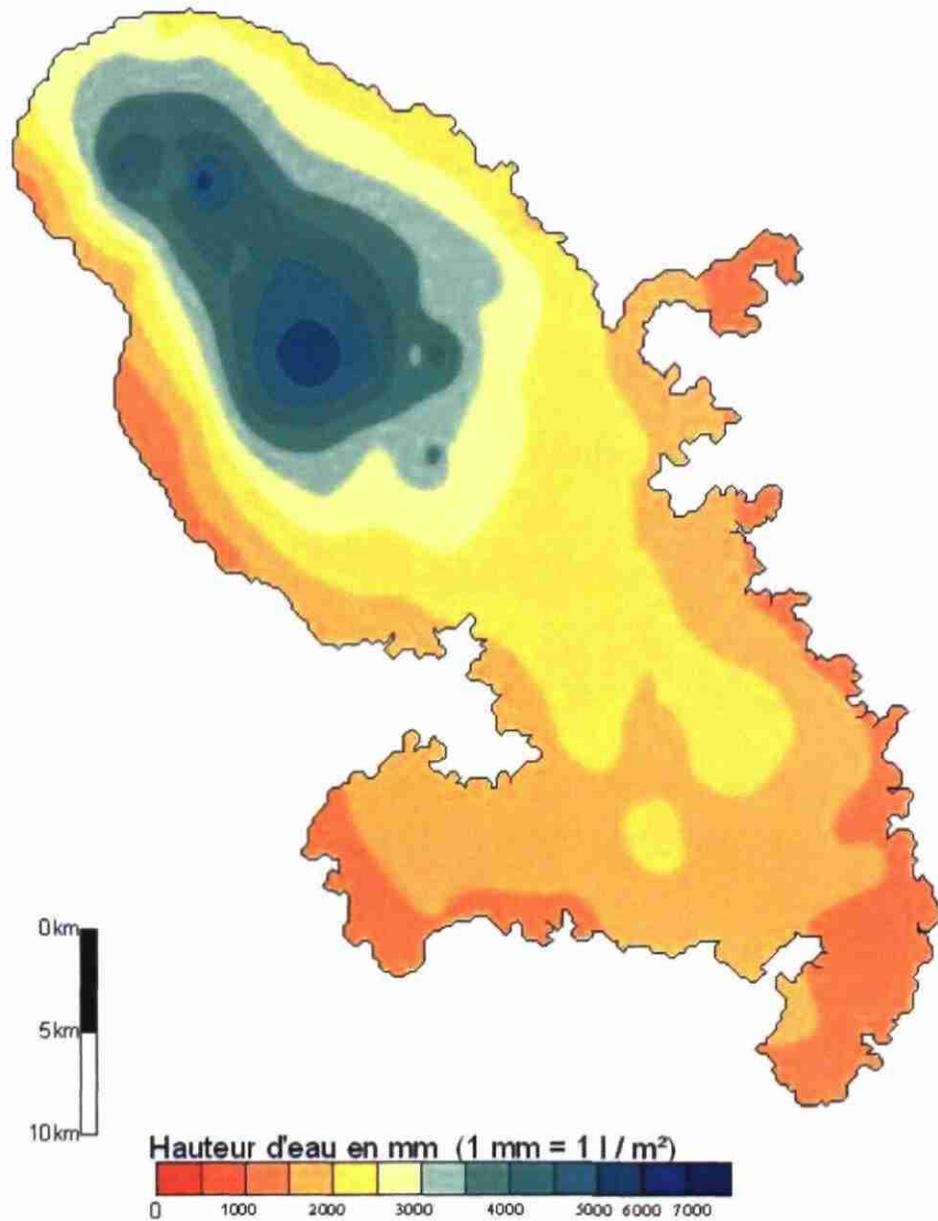
	Période	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
AJOUPA B. Eden	1979/2004	234,4	178,6	185,0	252,9	261,7	259,8	340,7	402,5	406,2	399,8	495,4	308,8	3725,8
BASSE POINTE Chalvet	1971/2004	129,7	97,2	103,3	132,4	149,7	146,7	198,5	254,7	274,7	299,8	307,3	203,3	2297,3
CASE PILOTE Choiseul	1975/2004	69,6	44,8	37,1	50,1	75,6	117,1	167,0	213,2	185,3	182,8	160,6	76,2	1379,4
DIAMANT Pavillon	1998/2004	64,0	44,0	44,2	78,6	67,1	93,8	123,0	116,5	98,8	203,1	217,0	95,7	1245,8
FORT de FRANCE Desaix	1971/2004	115,7	83,5	74,5	89,4	110,6	143,1	199,5	255,8	222,2	252,3	249,5	145,2	1941,3
FONDS st DENIS Cadets	1971/2004	254,4	167,4	148,1	134,6	151,1	227,1	344,5	372,1	319,2	313,6	328,6	234,6	2995,3
FRANCOIS Chopotte	1976/2004	84,0	58,9	60,7	97,6	123,4	107,7	146,2	178,8	1789,7	220,1	259,7	119,6	3246,4
GRAND RIVIERE Beaus.	1973/2004	163,2	114,6	129,8	165,0	186,5	205,4	262,2	311,1	314,5	328,9	364,8	246,7	2792,7
LAMENTIN Aéroport	1971/2004	117,5	86,9	89,1	101,6	117,9	152,3	187,3	259,4	229,8	267,8	264,2	158,1	2031,9
MACOUBA Bellevue	1974/2004	168,3	122,8	145,5	171,4	186,4	192,0	261,2	315,5	320,7	347,6	395,6	272,6	2899,6
MORNE ROUGE Gend.	1971/2004	336,0	232,6	222,1	225,4	258,0	321,0	438,8	485,8	449,6	446,0	496,5	391,1	4302,9
ROBERT Duchesne	1971/2004	105,7	81,8	83,3	120,6	131,6	124,3	163,6	216,8	228,9	264,8	280,9	152,1	1954,4
SAINT ESPRIT Baldara	1994/2004	108,5	64,5	76,1	91,6	106,7	102,1	161,3	148,0	153,5	240,2	262,7	116,2	1631,4
SAINT JOSEPH Lézarde	1971/2004	139,1	95,0	99,8	138,2	152,7	164,6	238,3	273,0	278,4	292,6	321,3	168,3	2361,3
SAINT PIERRE Périnelle	1972/2004	138,0	82,1	76,6	71,4	79,8	143,6	222,8	260,1	237,6	219,7	231,9	151,4	1915,0
SAINTE ANNE Seci	1973/2004	86,4	52,6	57,8	72,3	87,7	100,7	142,7	195,1	163,0	186,7	202,1	109,4	1456,5
SAINTE MARIE Bellevue	1979/2004	149,6	110,8	117,2	181,6	206,9	182,2	161,7	293,0	313,1	343,4	397,0	224,6	2681,1
SAINTE MARIE Concorde	1979/2004	144,2	104,8	112,3	199,2	217,3	179,9	262,1	284,6	319,6	359,0	402,3	227,8	2813,1
TROIS ILETS pagerie	1995/2004	85,8	49,5	48,1	41,2	63,1	122,5	204,6	240,8	172,6	246,6	208,9	134,8	1618,5
VAUCLIN Puyferrat	1979/2000	83,4	56,3	66,6	83,1	133,2	105,4	169,2	196,0	196,7	208,9	203,7	118,8	1621,3

Annexe 2

Donnees utilisees pour le calcul de la pluie efficace

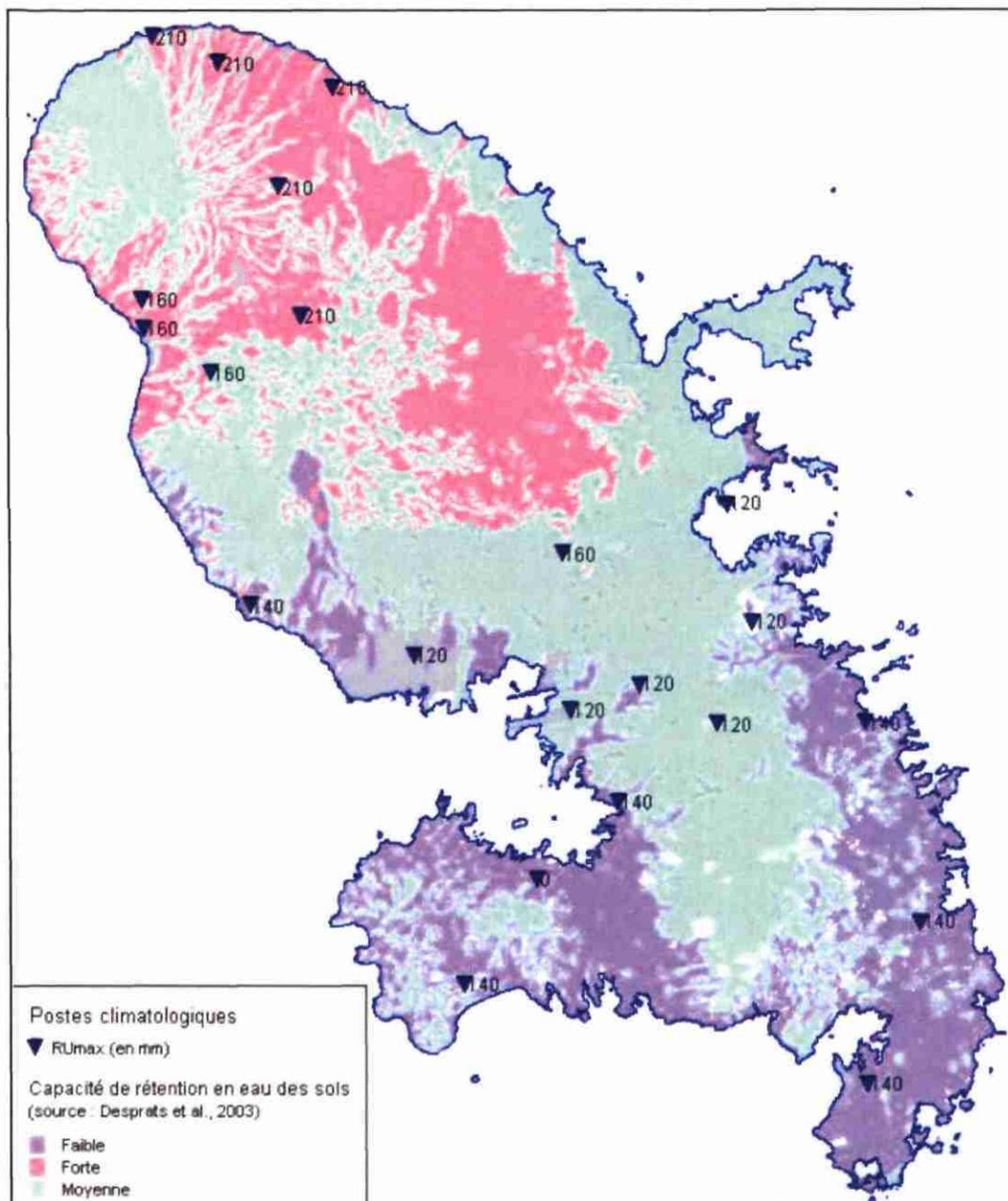


Carte des isohyètes



Pluviométrie moyenne annuelle calculée à partir de toutes les stations possédant au moins 10 années de données sur une période de 30 ans quelconque (de 1915 à 2006).
Source : Météo France, juin 2006.

Cartographie de la capacité de rétention en eau des sols

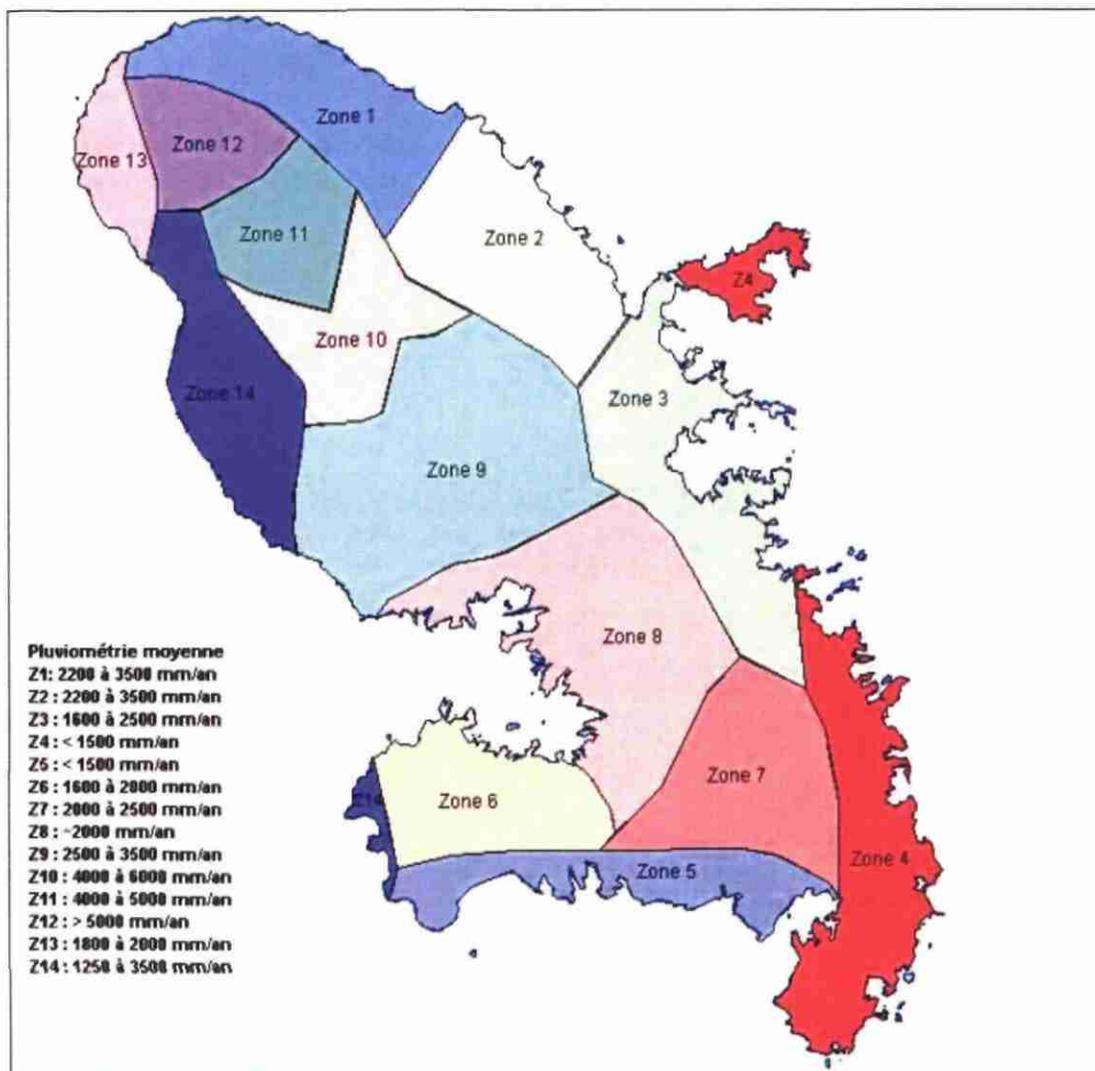


Classification de la capacité de rétention en eau des sols de la Martinique (Desprats J.F., Comte J.P. et Perian G., 2003) et localisation des postes climatologiques pour lesquels on dispose d'une mesure de la réserve utile maximale des sols (valeurs en

mm indiquées sur la carte). Les mesures de RUMax ont été réalisées par l'INRA Montpellier et sont issues du rapport de Requieq (1986).

POSTES CLIMATOLOGIQUES	HCF	RFU	RS
1 BASSE POINTE CHALVET	210	80	130
2 CASE PILOTE CHOISEUL	140	60	80
3 DUCOS LA MANZO	120	50	70
4 DUCOS PETIT BOURG-USINE	140	60	80
5 FONDS ST DENIS MORNE DES CADETS	160	60	100
6 FORT DE FRANCE BESAILL	120	50	70
7 GRAND RIVIERE BEAUSEJOUR	210	80	130
8 L'AJOUA BOUILLON EDEN	210	80	130
9 LE DIAMANT JACRUA	140	60	80
10 LE FRANCOIS CHOPOTTE	120	50	70
11 LE FRANCOIS SIMON (USINE)	140	60	80
12 LAURENTIN CENAGREF	120	50	70
13 LE LAURENTIN AEROPORT	120	50	70
14 LE MORNE ROUGE CHAMPFLORE	210	80	130
15 LE PRECHEUR BOISVILLE	120	50	70
16 LE VAUCLIN PUYFERRAT	140	60	80
17 LES TROIS ILETS STATION P.T.T.	140	60	80
18 MACOUBA BELLEVUE	210	80	130
19 SAINT JOSEPH RIVIERE LEZARDE	160	60	100
20 SAINT PIERRE PERIMELLE	160	60	100
21 SAINT PIERRE STADE	160	60	100
22 SAINTE ANNE BELFOND	140	60	80
23 LE ROBERT POINTE FORT	120	50	70
24 SAINTE MARIE BELLEVUE	210	80	130
25 LAURENTIN CTCs	120	50	70

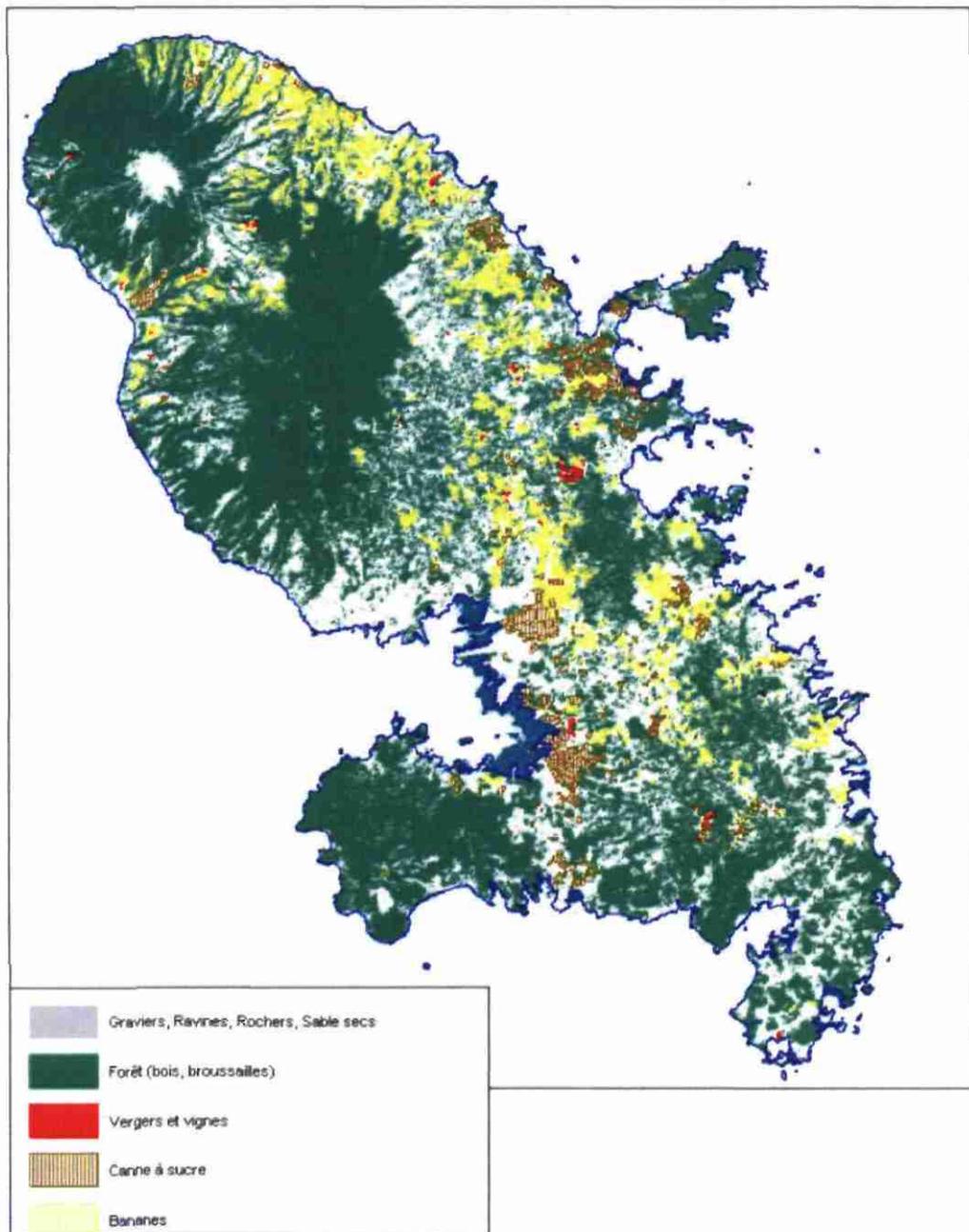
Zones pluviométriquement homogènes



D'après Mobèche et al. (2003)

Les zones pluviométriquement homogènes ont été déterminées avec, comme critère principal de découpage, la hauteur totale de pluie annuelle, mais aussi le nombre de jours de pluie, l'exposition, l'altitude et la pente.

Carte simplifiée d'occupation des sols



Source IRD – Voir Desprats et al. (2003)

Coefficients culturaux de la canne et de la banane

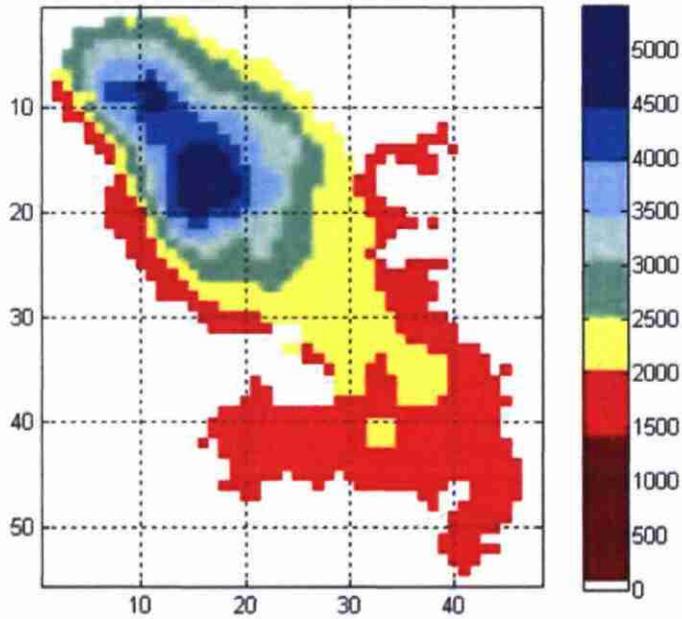
	Phase phenologique			
	Plantation	Croissance	Floraison	Recolte
Banane	0.4 à 0.6	0.6 à 1.2	1.2 à 1.6	0.8 à 0.6
Canne	0.2 à 0.4	0.6 à 1	1 à 1.2	0.6 à 0.2

Valeurs des coefficients culturaux (Kc) de la canne et de la banane en fonction du stade phenologique (Requieg, 1986). L'auteur donne egalement des indications sur la duree et la periode dans l'annee de chacun des stades.

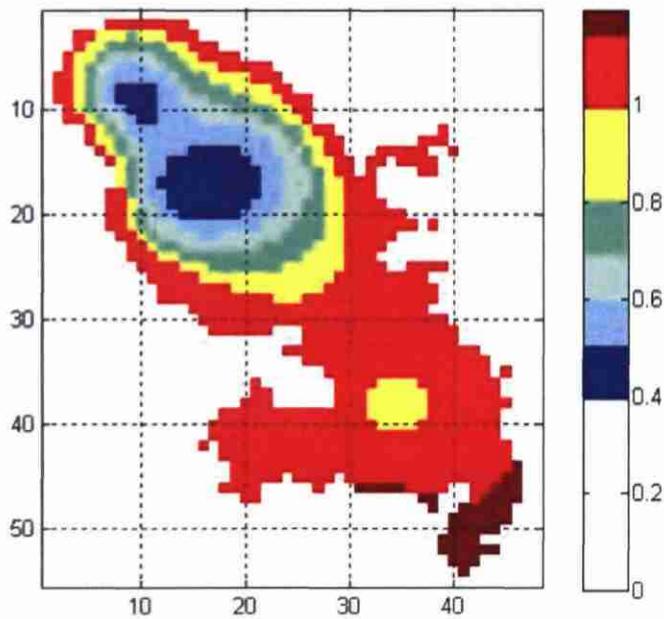
Annexe 3

Cartes discrétisées fournies en entrée du modèle numérique

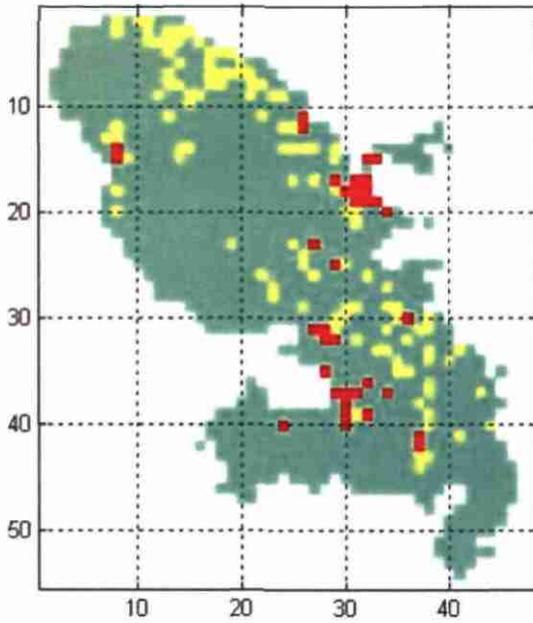
Isohyètes moyennes annuelles (en mm)



Iso-ETP moyennes annuelles (en mm) divisées par la valeur moyenne annuelle à Fort-de-France (1670 mm)

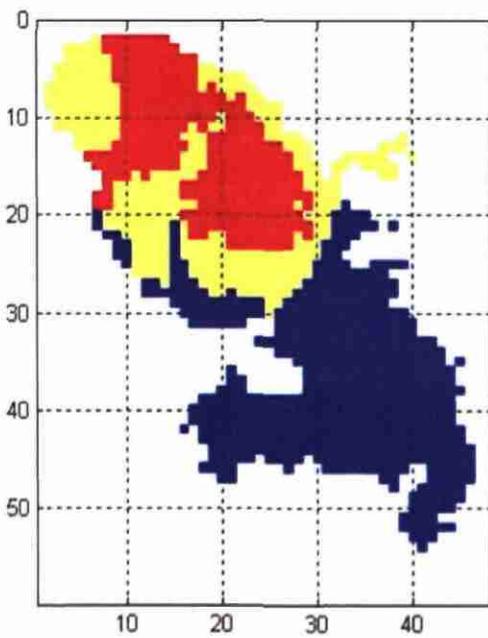


Occupation du sol simplifiée



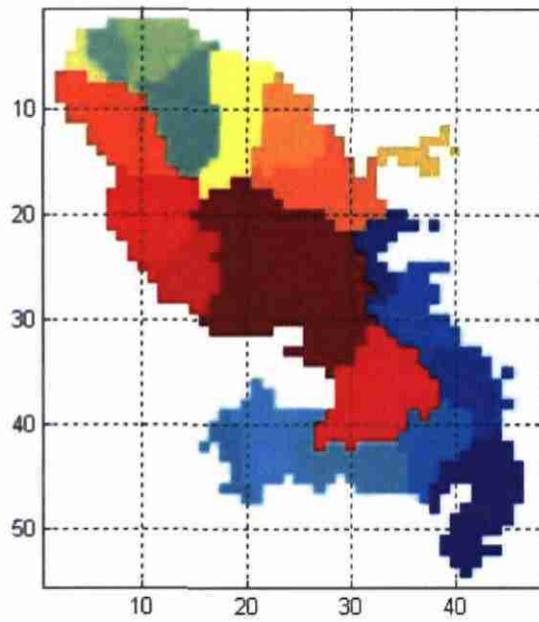
Légende : jaune = banane ; rouge = canne ; vert = autre

Réserve Utile maximale du sol



Légende : bleu = 120 mm ; jaune = 160 mm ; rouge = 210 mm

Découpage en 24 Unités Régionales



Annexe 4

Bilan hydrologique sur les bassins instrumentés

Tableau de comparaison Pluie efficace – débit à l'exutoire

Légende :

- Cumuls par année hydrologique, rapportée à la surface du BV
- Volumes cumulés exprimés en m³/km².
- Valeurs en violet italique : cumuls de débit calculés sur une année hydrologique incomplète.

Année hydrologique	SautBabin (BV1+BV11)		Pont Soudon (BV2+BV9+BV10)		Fontane BV3	
	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire
86-87	3141650,125		1812905,761	1594536,1	768984,563	
87-88	3339379,294		2121742,785	1863318,55	697915,154	
88-89	4853510,972		3051229,791	2740826,16	1284588,63	
89-90	4098327,537		2395492,24	1979915,83	651063,593	
90-91	3873205,177		2407471,779	2362751,72	1036794,17	
91-92	3044873,38		1978247,763	1684074,15	657449,889	
92-93	3974827,64		2814722,099	2157688,29	1093480,96	
93-94	3437156,098		2062466,868		515415,724	
94-95	2571822,517		2009115,716		462543,914	
95-96	3058382,897		2252146,779		824081,422	
96-97	3848276,685	2137360,58	2210016,638		585897,641	503832,304

Année hydrologique	Dormante BV4		Petit Bourg BV5		Pont Bassignac BV6	
	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire
86-87	512366,082		604979,8376		1377532,91	1124300,98
87-88	321775,9706		714825,8794		1793095,98	1603065,73
88-89	696751,2835		1151297,739		2541641,32	2164531,47
89-90	275698,4146		587331,9872		2049819,02	1593942,38
90-91	795299,3626		997327,8031		2426882,34	1775590,49
91-92	379951,2315		555831,0493		1829255,34	1275229,1
92-93	652146,4198		1113183,054		2432505,65	1939139,58
93-94	216738,7373		486158,9674		2013667,18	1569103,2
94-95	186106,983		349434,3113		1946233,71	
95-96	736850,0123	281515,978	940182,3556	918607,75	2126873,31	
96-97	441054,1669	623222,346	712093,5785	737094,009	2328764,92	

Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique : identification et caractérisations quantitatives

Année hydrologique	FontBaise BV7		FontRousseau BV8		Alma BV9	
	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire
86-87	2320363,349		1326278,44		3196029,73	3058638,19
87-88	2395787,908		1602537,235	986444,868	3399665,63	3030079,28
88-89	3810024,117		2372197,36	1768439,97	4805936,73	4540925,97
89-90	2812021,03		1767626,485	1118147,72	3885631,76	3183234,03
90-91	3189350,445		1796449,944		3897893,49	3787017,56
91-92	2462956,221		1409923,123		3462583,61	3869566,7
92-93	2999406,571		2192136,686		4225953,07	4262882,17
93-94	2527024,853		1494634,544		3611464,67	4755616,29
94-95	2078240,583		1479962,181		3272819,27	
95-96	2680517	1921132,56	1683399,996	903682,42	3810831,17	4128297,6
96-97	2908143,3	2058796,56	1546698,345	1085566,5	4195650,12	3946974,84

Année hydrologique	Lézarde 2 (BV9+BV10)		Macintosh BV11	
	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire	Cumul Peff calculée	Débits cumulés à l'exutoire
86-87	2844365,042	1915640,7	3328417,124	2698018,89
87-88	3183703,354	2550769,95	3536049,066	3042384,6
88-89	4443954,928	3418028,95	5062892,456	4237493,37
89-90	3615275,825	2553387,73	4247278,914	3196112,56
90-91	3600878,423	2752418,42	4073034,576	3489227,02
91-92	3086778,345	2655891,05	3317420,481	2444943,84
92-93	4063049,841	3060741,48	4230790,618	3595008,92
93-94	3155817,422	2218457,17	3661554,778	3028239,38
94-95	3067865,158	1505448,94	2893089,414	2245578,29
95-96	3466714,083	2486449,21	3436174,042	3481847,12
96-97	3446895,059	2782205,6	4127181,384	

Les surface et prélèvements utilisés dans le calcul sont rappelés dans le tableau suivant.

	Surf ds modèle (km2)	Surf réelle (km2)	Prélèvements (m3/an)
SautBabin (BV1+BV11)	33	34,04	413034
Pont Soudon (BV2+BV9+BV10)	65	66,74	24192200
Fontane BV3	7	7,9	
Dormante BV4	9	10,74	
Petit Bourg BV5	35	35,15	
Pont Bassignac BV6	14	12,87	
FontBaise BV7	21	20,25	122640
FontRousseau BV8	14	13,23	5,00E+06
Alma BV9	4	4,42	
Lézarde 2 (BV9+BV10)	15	13,07	
Macintosh BV11	16	16,73	87600

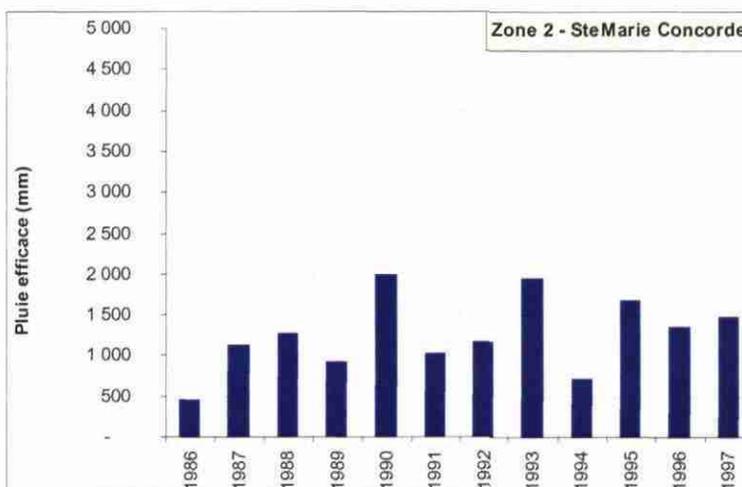
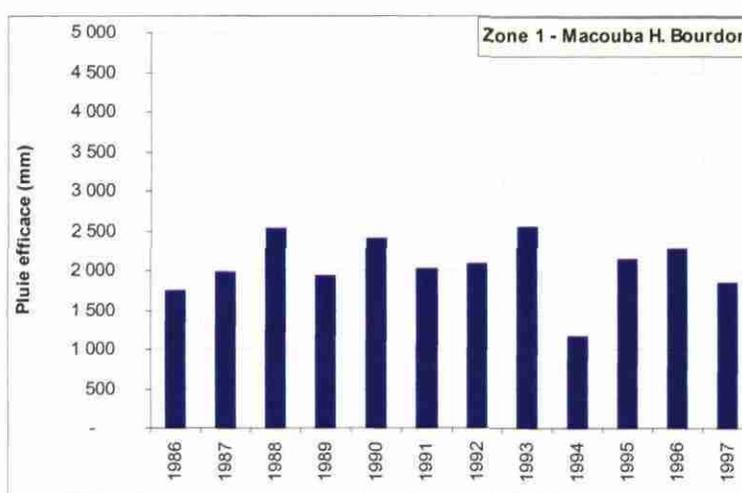
Annexe 5

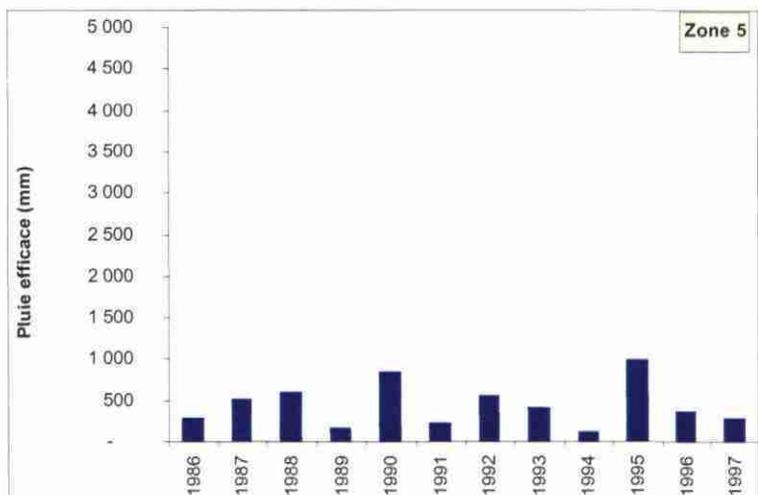
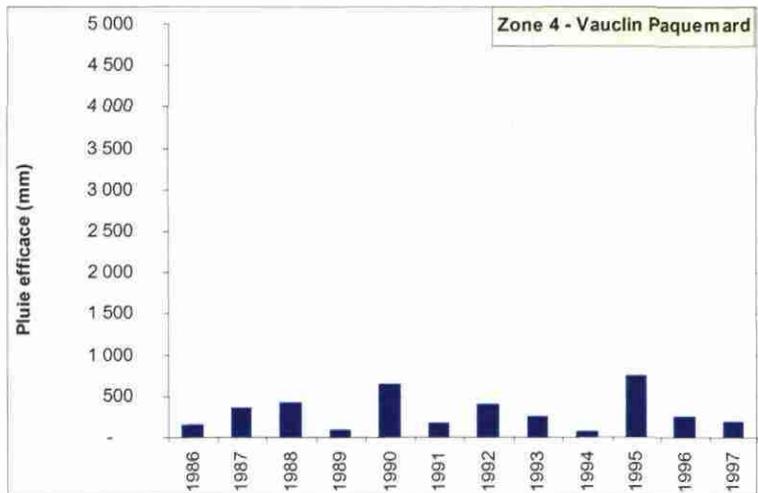
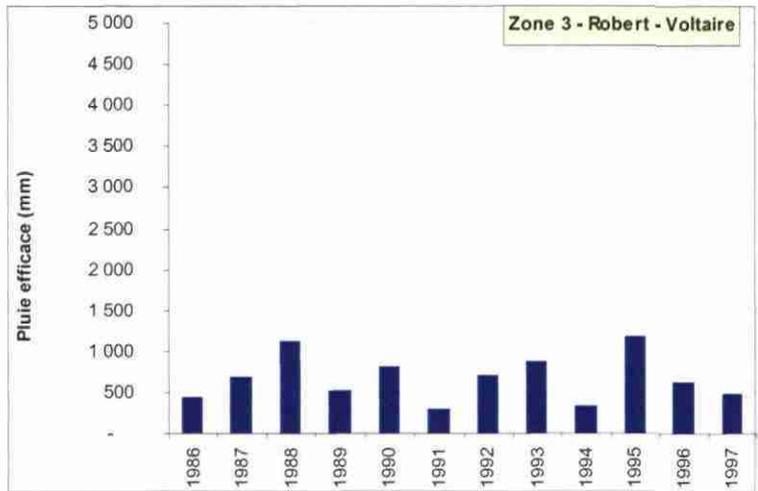
Résultats détaillés des calculs de pluie efficace

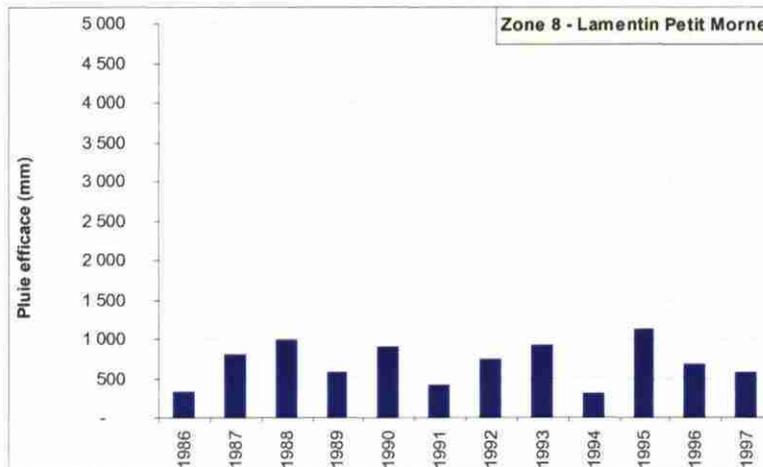
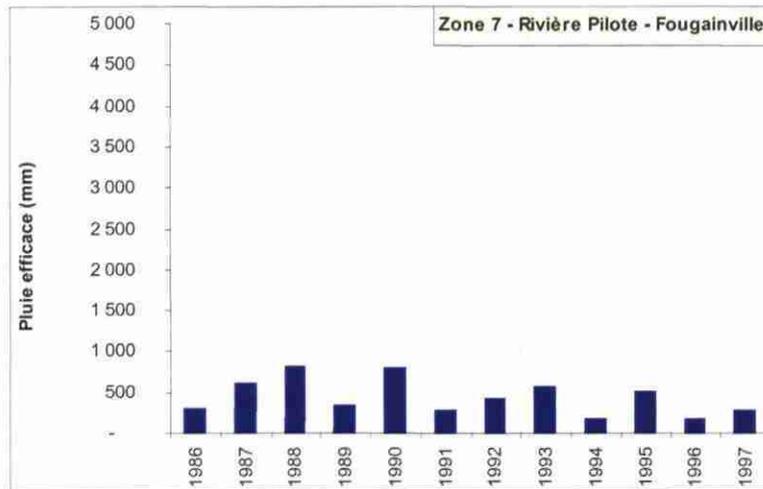
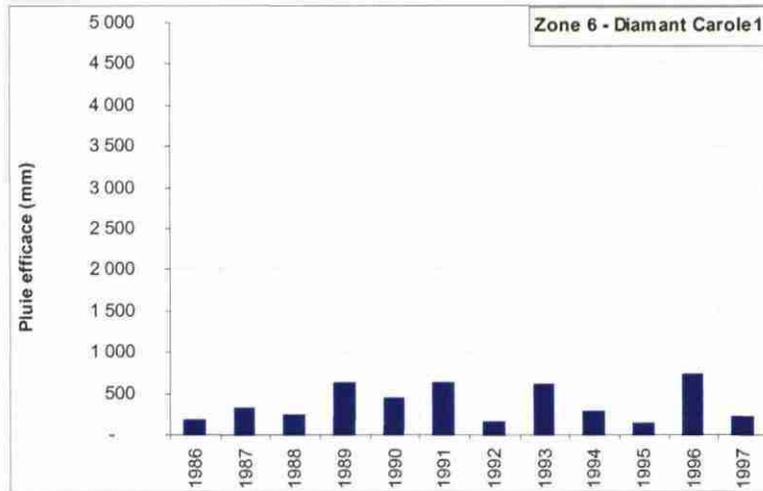
Pluie efficace annuelle dans chaque zone pluviométriquement homogène

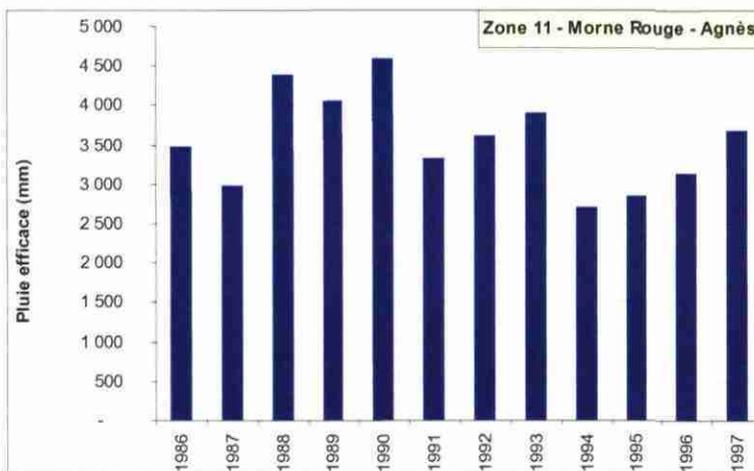
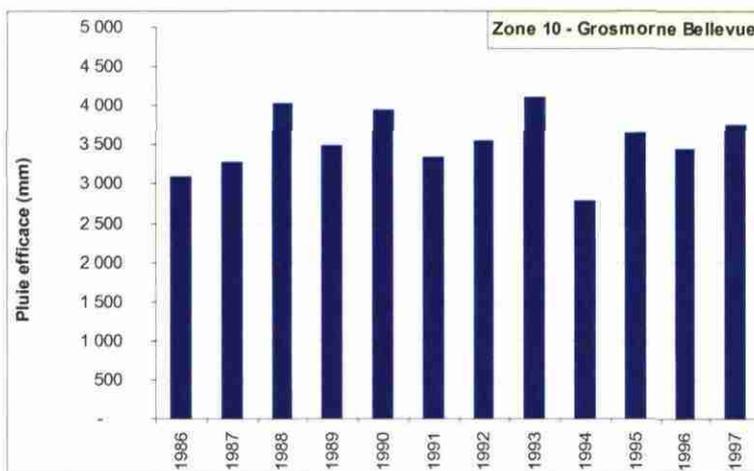
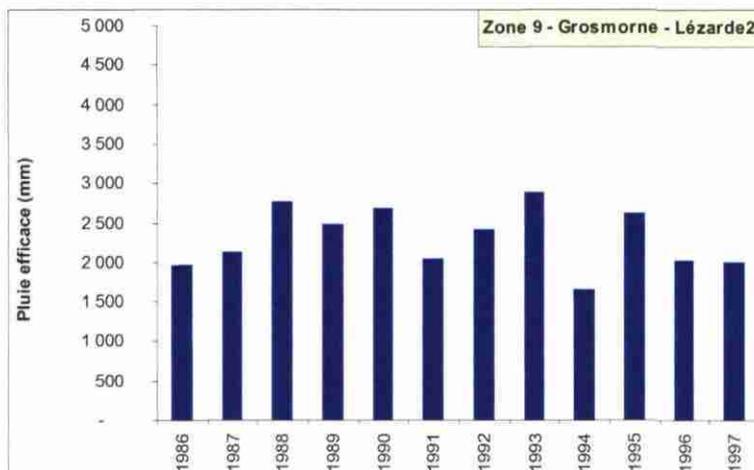
Les valeurs journalières de la pluie efficace ont été extraites de la matrice des résultats puis cumulées par année (période 1986-1997). On dispose ainsi de 14 séries de pluies efficaces annuelles calculées à l'endroit de chacun des pluviomètres de référence (pour la zone 5 dépourvue de station de mesure, la pluie efficace annuelle a été calculée en un point central).

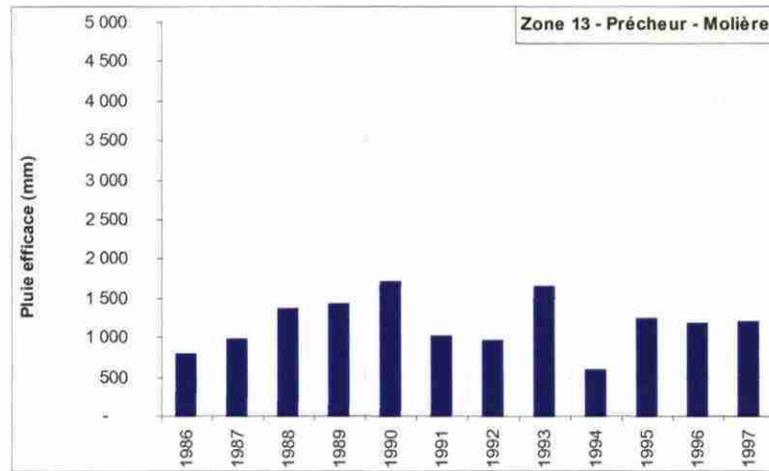
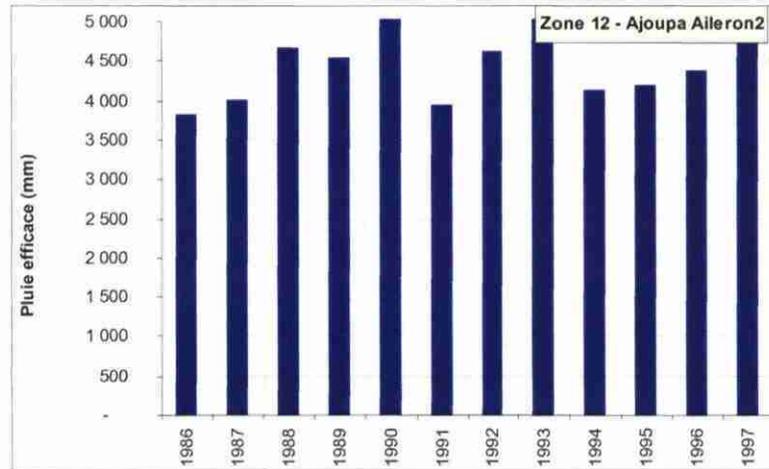
Les variations annuelles en chacun des points sont représentées sur les 14 graphiques suivants.











	L	C
Z1	4	10
Z2	13	26
Z3	22	31
Z4	40	42
Z5	45	36
Z6	41	26
Z7	41	38
Z8	29	28
Z9	19	23
Z10	16	20
Z11	12	13
Z12	8	10
Z13	9	5
Z14	20	13

*Coordonnees (dans la matrice 55 L * 48 C) des points representes sur les graphes precedents*

Annexe 6

Sensibilite au parametre β des debits simules

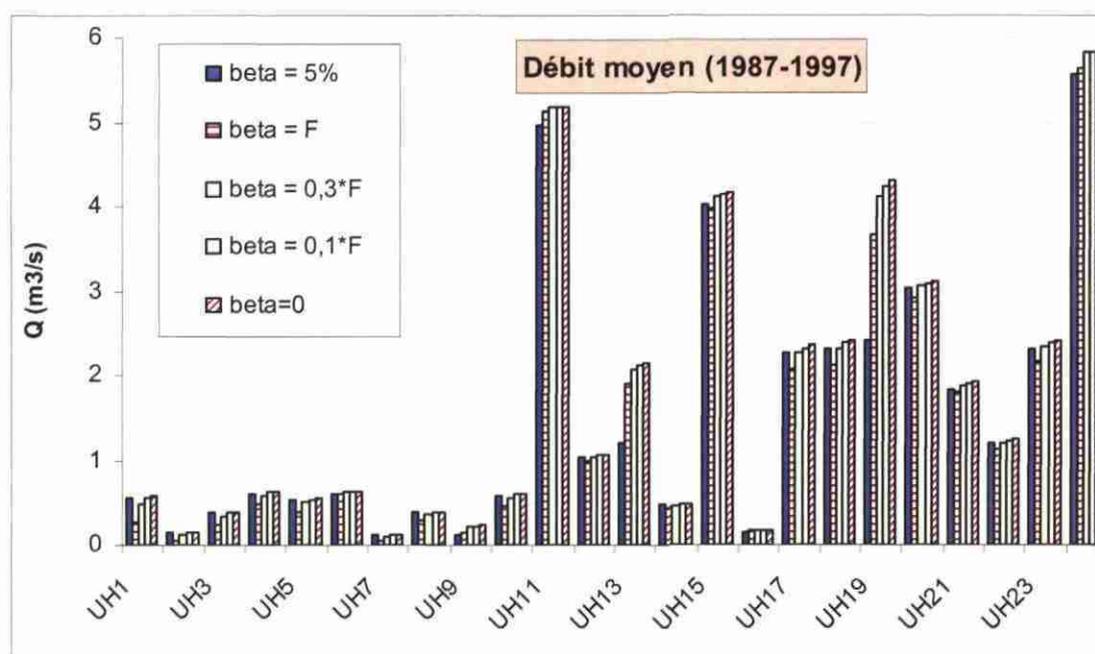


On compare sur les graphes suivants les débits moyens, maximum et minimum simulés pour chaque UR sur la période 1987-1997 avec cinq jeux différents du paramètre de fuite en mer (β), tous les autres paramètres étant fixés (valeurs par défaut présentées dans ce rapport).

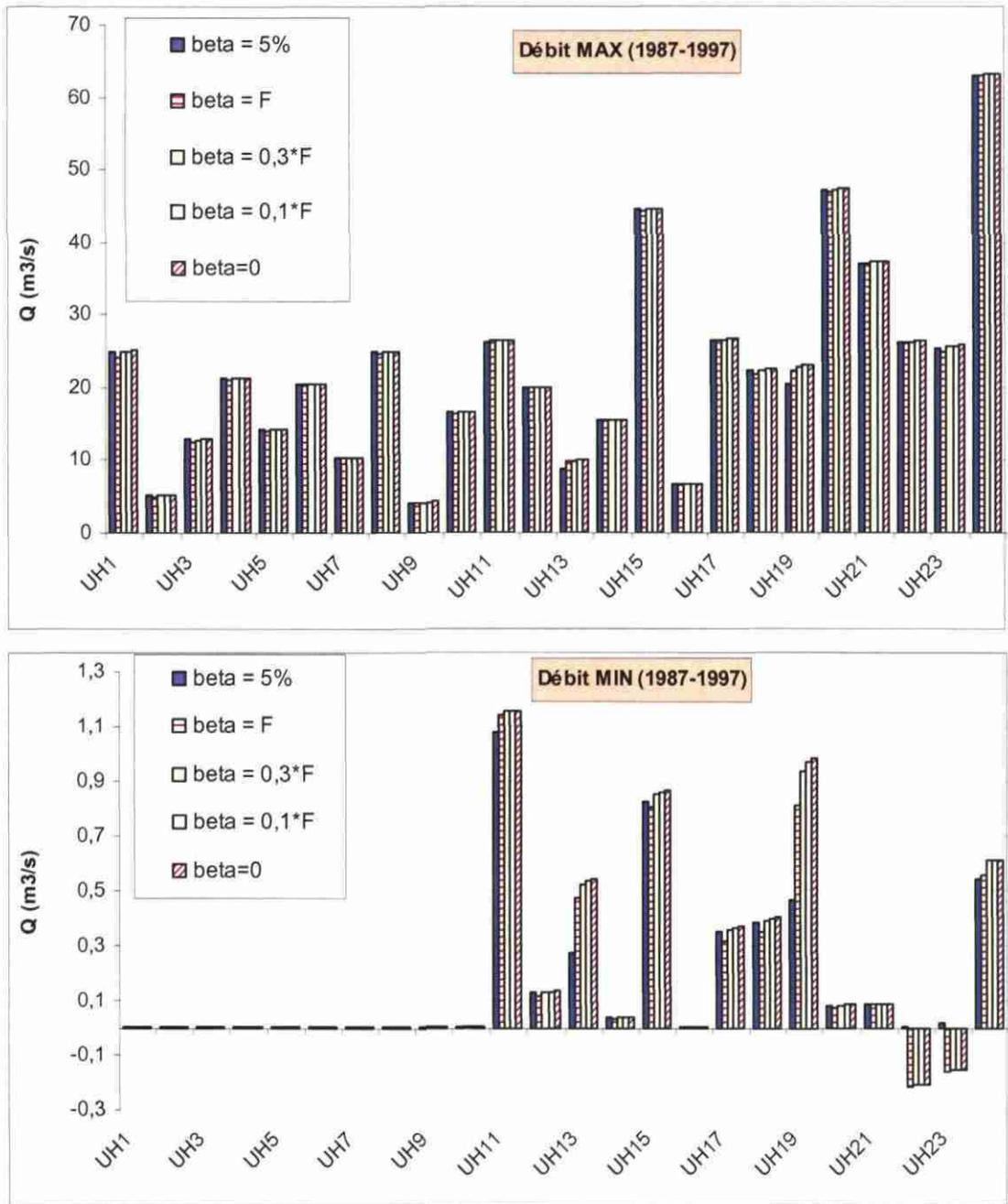
- Jeu 1 : $\beta=5\%$ pour toutes les UR, sauf $\beta=50\%$ pour les UR 9, 13 et 19
- Jeu 2 : $\beta=F$
- Jeu 3 : $\beta=0.3*F$
- Jeu 4 : $\beta=0.1*F$
- Jeu 5 : $\beta=0$ pour toutes les UR

Avec F le facteur de forme de l'UR ($F=L_{litt}/(L_{litt}+L_{riv})$, voir §d) et tableau ci-dessous).

UR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F	62%	73%	47%	31%	32%	6%	77%	33%	38%	27%	1%	15%
UR	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
F	12%	26%	7%	¹⁹	15%	15%	17%	13%	7%	16%	11%	4%



¹⁹ Cette UH correspond à la presqu'île de la Caravelle. Le coefficient n'a pas été calculé pour cette UH compte-tenu de sa situation particulière. Il sera supposé nul par la suite.

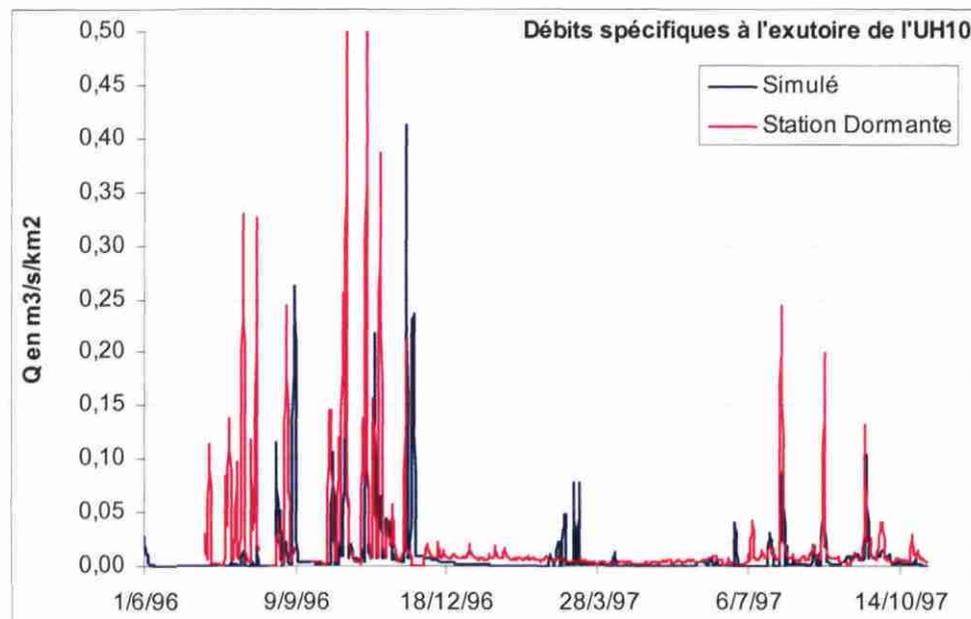
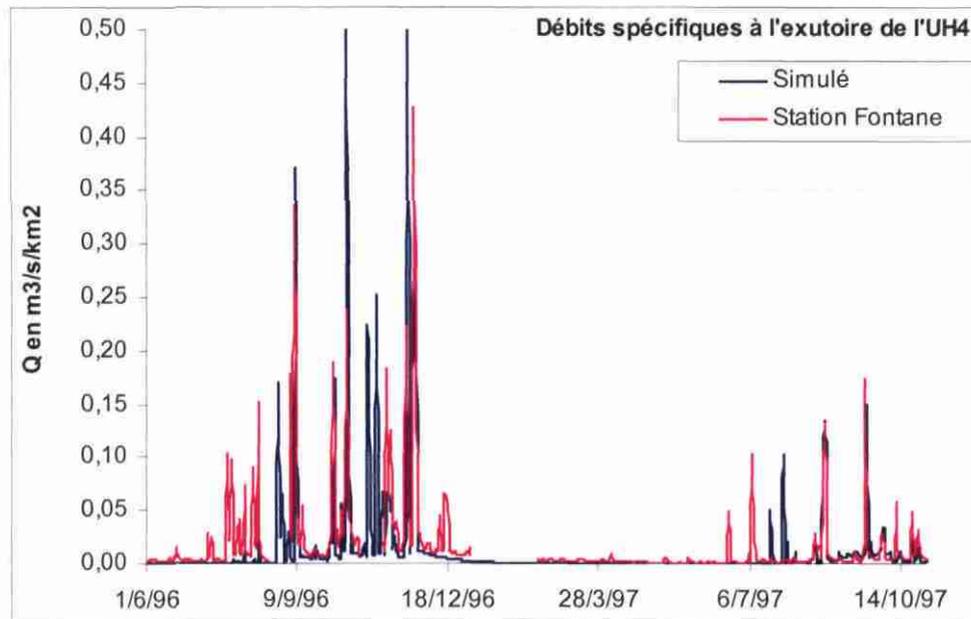


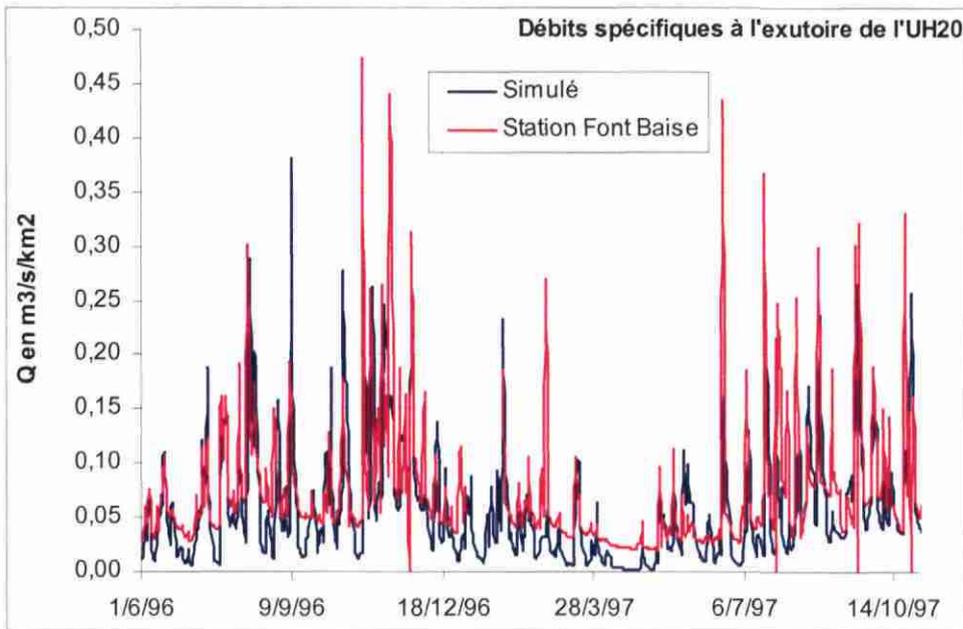
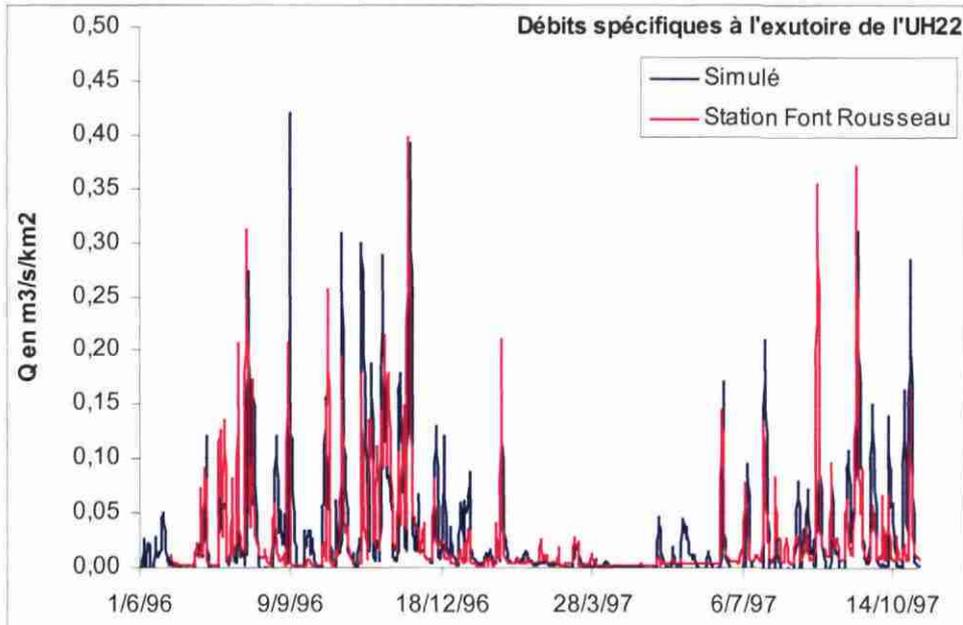
Remarque : les débits minimums négatifs simulés pour les UR22 et UR23 sont dus au captages de surface trop importants (leur répartition annuelle (voir §d)) n'a pas été redéfinie pour cette étude de sensibilité).

Annexe 7

Débits spécifiques simulés sur la période 1987- 1997



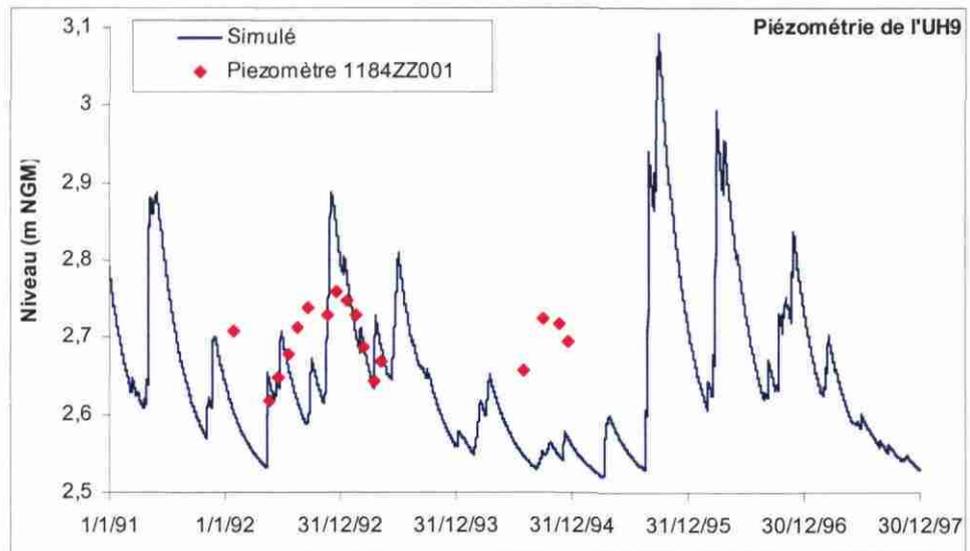
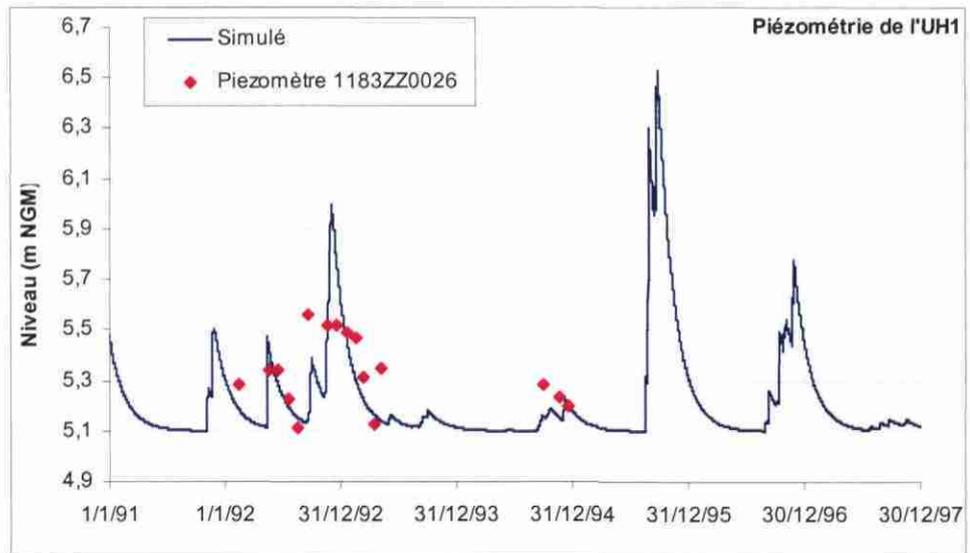


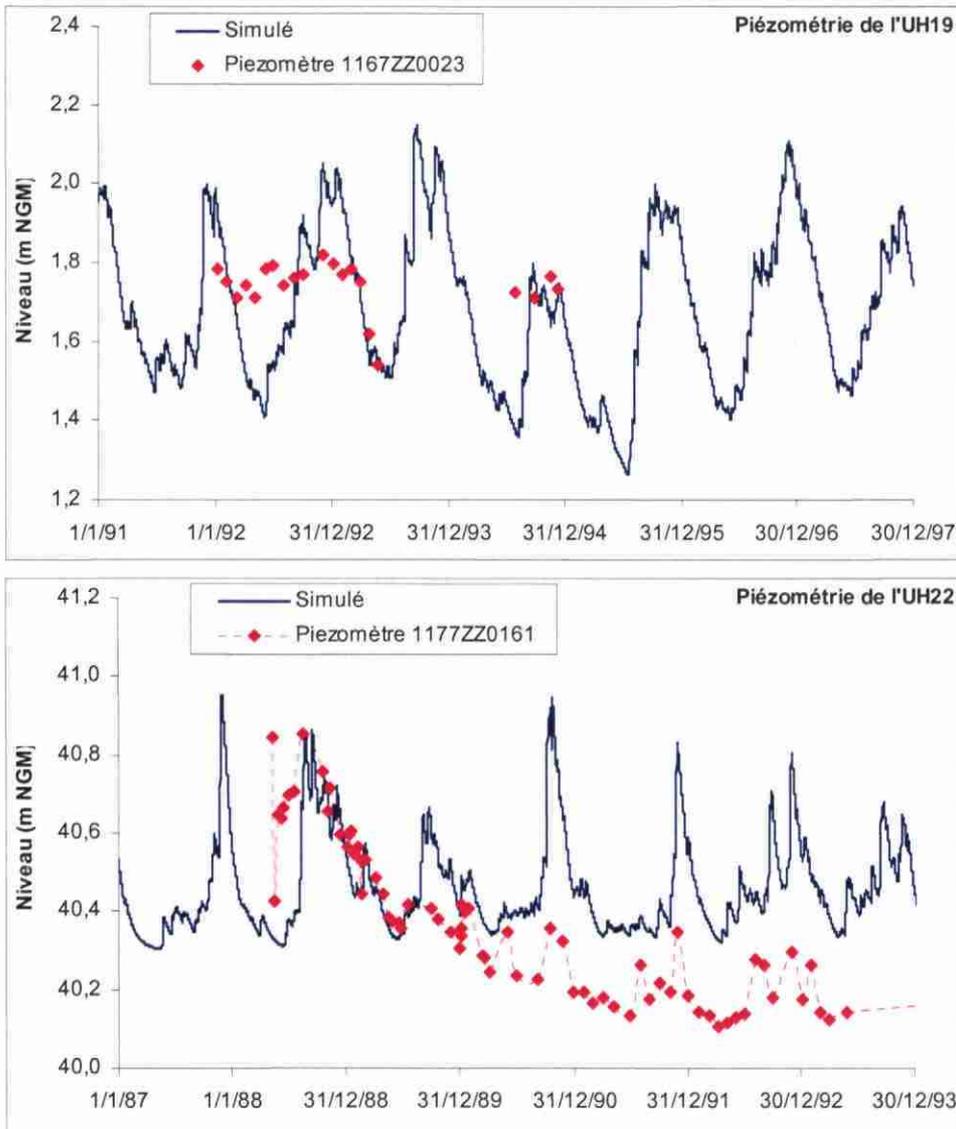


Les débits de l'UR10 sont moins bien reproduits que ceux des autres UR principalement en raison de l'approximation faite sur la pluviométrie d'entrée du modèle. En effet, l'UR10 se situe dans la Zone Pluviométriquement Homogène n°5 pour laquelle on ne dispose pas de pluviomètre de référence. La pluviométrie utilisée est donc celle de la ZPH n°4.

Annexe 8

Piézométrie simulée sur la période 1987-1997





Le niveau d'eau est calculé à partir du volume d'eau simulé en introduisant une « porosité efficace » de 7% pour l'UR1, 10% pour les UR22 et 24, et 20% et 24% pour les UR9 et 19 réputées plus perméables. Ces valeurs, qui peuvent paraître particulièrement élevées en contexte volcanique, s'apparentent en fait à une porosité équivalente. C'est une grandeur macroscopique, égale au rapport des vides (porosité, fissures, fractures...) situés dans la zone de battement annuel de la nappe, sur le volume total de l'UR. Compte-tenu de la faible profondeur des nappes en général en Martinique, ces « vides » incluent principalement les terrains les plus superficiels (sols, formations superficielles, partie supérieure des aquifères, etc.) qui présentent a priori une porosité efficace plus élevée que les formations volcaniques sous-jacentes.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 - France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional de la Martinique
4, lot. Miramar
Pointe des Nègres
97200 Fort de France
Tél. : 05 96 71 17 70 – Fax : 05 96 63 21 15