



Hydrologie souterraine

Ressources souterraines dans les DOM

Octobre 2012



SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Dans le cadre du projet « Explore 2070 » et afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les niveaux de nappes et les débits des cours d'eau, le groupement BRGM/ ARMINES a proposé, vu le temps imparti, d'utiliser les modèles hydrodynamiques maillés, déjà construits et calés sur la période actuelle. Ces modèles, dont l'historique, la description et le calage ont été détaillés dans le rapport d'avancement précédent, font chacun l'objet d'un rapport séparé. Le présent rapport traite des ressources en eau des DOM et de l'impact du changement climatique sur ces ressources.

Si l'on ne tient pas compte de la problématique qualité, les ressources en eau des DOM sont importantes et ne sont que partiellement exploitées sur la partie eau souterraine.

L'impact du changement climatique pourrait, d'après les estimations réalisées, induire une augmentation de température de l'ordre de 2°C ce qui aurait pour conséquence d'augmenter l'ETP de l'ordre de 10% (variable suivant l'altimétrie), et réduire ainsi d'autant les ressources mais elles resteraient globalement suffisantes pour la satisfaction des besoins.

Il est toutefois probable que cet impact serait plus prononcé sur les côtes « sous le vent » et que dans ces zones cela pourrait poser problème, si l'on prend comme critère la DCE, vis-à-vis du bon état environnemental.

Hormis la Guyane qui ne devrait pas souffrir de cette diminution des ressources, l'impact de ce changement devrait aggraver la situation actuelle sur les autres DOM, situation qui a déjà mis en évidence :

- Une mauvaise répartition locale de la ressource, obligeant ainsi à envisager des transferts d'eau de l'est vers l'ouest (Réunion, Guadeloupe) ou du nord vers le sud (Martinique)
- Une possible remontée du biseau salé, à proximité de la mer au droit des zones basses (remontée du niveau marin) et/ou des zones fortement exploitées.

SOMMAIRE

1.	PRESENTATION GENERALE	12
1.1.	OBJECTIF DU PROJET	12
1.2.	RAPPEL DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE	12
1.3.	CONTENU DU PRESENT RAPPORT	12
2.	LA GUADELOUPE	14
2.1.	GRANDE TERRE	14
2.1.1.	GENERALITES	14
2.1.2.	CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE : RAPPEL SUR LES DONNEES DISPONIBLES ET LES HYPOTHESES RETENUES	17
2.1.2.1.	<i>Géométrie de l'aquifère</i>	17
2.1.2.2.	<i>Conditions aux limites du modèle</i>	20
2.1.2.3.	<i>Prélèvements</i>	20
2.1.2.4.	<i>Alimentation du système</i>	21
2.1.2.5.	<i>Réserve Facilement Utilisable (RFU)</i>	22
2.1.2.6.	<i>Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère</i>	22
2.1.2.7.	<i>Piézométrie de référence</i>	22
2.1.2.8.	<i>Points d'eau de référence</i>	23
2.1.2.9.	<i>Interface eau douce – eau salée</i>	23
2.1.3.	CALAGE DU MODELE NUMERIQUE	23
2.1.3.1.	<i>Méthodologie du calage</i>	23
2.1.3.2.	<i>Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère</i>	24
2.1.3.3.	<i>Paramètres pour le calcul de la recharge de la nappe</i>	24
2.1.3.4.	<i>calcul en mode diphasique</i>	25
2.1.3.5.	<i>calage du modèle numérique</i>	25
2.1.3.6.	<i>Résultats du calage : comparaison des piézométries observées et simulées</i>	25
2.1.3.7.	<i>Paramètres hydrodynamiques</i>	28
2.1.3.8.	<i>Paramètres de calcul de l'infiltration</i>	29

2.1.3.9.	<i>Fluctuations de l'interface eau douce – eau salée</i>	30
2.1.3.10.	<i>Résultats des bilans hydrodynamiques</i>	31
2.1.3.11.	<i>Impact de l'élévation de la mer sur le biseau salé</i>	32
2.2.	BASSE TERRE	38
2.2.1.	PRESENTATION GENERALE	38
2.2.2.	EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DE BASSE TERRE	41
2.2.2.1.	<i>analyse des données hydrométriques</i>	41
2.2.2.2.	<i>L'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR)</i>	42
2.2.2.3.	<i>ESTIMATION DE LA PLUIE EFFICACE</i>	45
2.2.2.4.	<i>estimation de la part d'eau infiltrée</i>	47
2.3.	MARIE GALANTE	51
2.4.	SAINT MARTIN	55
2.5.	LA DESIRADE, SAINT-BARTHELEMY ET LES SAINTES	55
2.6.	CONCLUSION	56
3.	LA GUYANE	58
3.1.	CONCLUSION	60
4.	MARTINIQUE	61
4.1.	CONTEXTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIE	61
4.2.	CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES DES PRINCIPALES FORMATIONS GEOLOGIQUES - PRINCIPAUX AQUIFERES RECONNUS	65
4.2.1.	LES LAVES.....	66
4.2.2.	LES PYROCLASTITES	69
4.2.3.	LES HYALOCLASTITES	71
4.2.4.	LES CONGLOMERATS ET LAHARS.....	72
4.2.5.	LES CALCAIRES (ORIGINE SEDIMENTAIRE)	73
4.2.6.	LES FORMATIONS SUPERFICIELLES RECENTES.....	73
4.3.	AMELIORATION DE LA CONNAISSANCE	74
4.3.1.	ELEMENTS SUR LA STRUCTURE DES AQUIFERES DE MARTINIQUE.....	75
4.3.2.	ELEMENTS SUR LE FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES DE MARTINIQUE	79
4.3.2.1.	<i>Alimentation des aquifères (entrées)</i>	80

4.3.2.2.	<i>Limite des bassins versants hydrogéologiques. Concept d'unités régionales.....</i>	80
4.3.2.3.	<i>Exutoires des eaux souterraines.....</i>	82
4.4.	EVALUATION QUANTITATIVE GLOBALE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DE LA MARTINIQUE	87
4.4.1.	INTRODUCTION	87
4.4.2.	CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE DE LA MARTINIQUE	87
4.4.2.1.	<i>Pluviométrie.....</i>	87
4.4.2.2.	<i>Evapotranspiration.....</i>	90
4.4.2.3.	<i>Bilan hydrologique.....</i>	92
4.4.3.	ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS PAR L'APPROCHE DE MODELISATION PLUIE-DEBIT (TEMPO).....	94
4.4.3.1.	<i>Principe général de l'approche de modélisation Tempo</i>	94
4.4.3.2.	<i>Application à la Martinique.....</i>	95
4.4.3.3.	<i>Synthèse des résultats obtenus par l'approche de modélisation Tempo.....</i>	96
4.4.4.	MODELISATION GLOBALE DES RESSOURCES EN EAU.....	99
4.4.4.1.	<i>Principe de la modélisation globale</i>	99
4.4.4.2.	<i>Application à la Martinique.....</i>	104
4.4.4.3.	<i>Modélisation numérique</i>	114
4.4.5.	RESULTATS : EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU.....	120
4.4.5.1.	<i>Pluie efficace.....</i>	120
4.4.5.2.	<i>Bilans par Unité Régionale.....</i>	121
4.5.	EVALUATION DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE POTENTIELLEMENT EXPLOITABLE EN MARTINIQUE	125
4.5.1.	METHODOLOGIE	125
4.5.2.	RESULTATS	125
4.5.2.1.	<i>Ressource potentiellement exploitable par unité</i>	125
4.5.2.2.	<i>Synthèse des ressources potentiellement exploitable sur l'ensemble de la Martinique.....</i>	131
4.6.	CONCLUSION	135
5.	LA REUNION	136
5.1.	CONTEXTE.....	136
5.1.1.	GENERALITES.....	136
5.1.2.	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES	138

5.1.3.	CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES	138
5.1.4.	CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES	140
5.1.5.	CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES	143
5.1.5.1.	<i>Hydrogéologie du domaine littoral</i>	143
5.1.5.2.	<i>Hydrogéologie du domaine d'altitude</i>	144
5.1.5.3.	<i>Circulations souterraines particulières</i>	145
5.1.5.4.	<i>Influence de la mer</i>	145
5.1.5.5.	<i>Nappes stratégiques</i>	146
5.2.	CALCUL DE LA PLUIE EFFICACE.....	147
5.2.1.	PRINCIPE DU CALCUL : MODELE DE THORNTHWAITE.....	147
5.2.2.	DESCRIPTION DE LA METHODE UTILISEE DANS L'ETUDE.....	148
5.2.3.	PLUVIOMETRIE.....	148
5.2.3.1.	<i>Présentation</i>	148
5.2.3.2.	<i>Zonage pluviométrique</i>	149
5.2.3.3.	<i>Les stations pluviométriques sélectionnées pour l'étude</i>	151
5.2.3.4.	<i>Distribution spatiale de la pluviométrie</i>	151
5.2.4.	EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE.....	153
5.2.4.1.	<i>Température</i>	153
5.2.4.2.	<i>Evapotranspiration potentielle</i>	156
5.2.5.	RESERVE UTILE	160
5.2.5.1.	<i>La carte des sols</i>	160
5.2.5.2.	<i>Carte de la Réserve Utile</i>	162
5.2.5.3.	<i>Traitement de la carte de la Réserve Utile</i>	163
5.3.	CALCUL DE LA PLUIE EFFICACE.....	166
5.3.1.	PLUIE EFFICACE A L'ECHELLE DES MASSES D'EAU	167
5.3.2.	DECOMPOSITION DE LA PLUIE EFFICACE	168
5.3.2.1.	<i>Méthodologie utilisée</i>	168
5.3.2.2.	<i>Modélisation</i>	168
5.3.2.3.	<i>IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux)</i>	169
5.3.2.4.	<i>Détermination de la part de ruissellement et d'infiltration</i>	170
5.3.2.5.	<i>Estimation de la recharge</i>	171
5.3.3.	BILAN A L'ECHELLE DES MASSES D'EAU	173
5.3.4.	SENSIBILITE DE LA PLUIE EFFICACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	175

5.4. CONCLUSION 176

Liste des illustrations

<i>Illustration 1 : Ensembles morphologiques et structuraux principaux de la Grande Terre (Guadeloupe).....</i>	<i>16</i>
<i>Illustration 2 : Extension latérale et topographie du modèle à la grille au pas de 200 m (m NGG).....</i>	<i>19</i>
<i>Illustration 3 : Extension et côtes du substratum des calcaires supérieurs et du niveau volcano-sédimentaire.....</i>	<i>19</i>
<i>Illustration 4 : Exemple de profil vertical Ouest-Est du modèle.....</i>	<i>20</i>
<i>Illustration 5 : Conditions aux limites du modèle.....</i>	<i>21</i>
<i>Illustration 6 : Zones de données météo (Pluie, ETP).....</i>	<i>22</i>
<i>Illustration 7 : Carte piézométrique de référence – septembre 1989.....</i>	<i>23</i>
<i>Illustration 8 : Carte des charges simulées pour les hautes eaux de septembre 1989 (m NGG) et délimitation de la zone de captivité de la nappe.....</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 9 : Calage de la piézométrie des différents secteurs : Grands Fonds, Plaine des Grippons, Plateaux du Nord, Plateaux de l'Est.....</i>	<i>28</i>
<i>Illustration 10 : Répartition des perméabilités (gauche) et du coefficient d'emmagasinement (droite) obtenues par calage.....</i>	<i>29</i>
<i>Illustration 11 : Zonation de la Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration (mm), de la hauteur d'équi-ruissellement percolation (mm) et du temps de demi-percolation (jours)30</i>	
<i>Illustration 12 : Profondeur calculée de l'interface eau douce–eau salée (m NGG)- Sept. 1989.....</i>	<i>31</i>
<i>Illustration 13 : Définition des zones de bilans hydrodynamiques.....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 14 : Localisation des sections de l'illustration 15.....</i>	<i>33</i>
<i>Illustration 15 : Impacts de la remontée du niveau marin (+1.00 m) sur la salinité.....</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 16 : Ensembles volcano-structuraux de la Basse-Terre (d'après D. Westercamp).</i>	<i>39</i>
<i>Illustration 17 : Répartition des bassins selon leur type AA (Aquifère Alimentant majoritairement la rivière) ou RR (Rivière alimentée majoritairement par l'écoulement Rapide).....</i>	<i>42</i>
<i>Illustration 18 : Valeur de l'IDPR par unités fonctionnelles.....</i>	<i>43</i>
<i>Illustration 19 : Classement des bassins versants selon les typologies (AA-SI, AA-SR, RR-SI & RR-SR).....</i>	<i>44</i>
<i>Illustration 20 : Modèle de Thornthwaite (1948).....</i>	<i>45</i>
<i>Illustration 21 : Paramètres nécessaires au calcul de la pluie efficace.....</i>	<i>46</i>
<i>Illustration 22 : approche globale simplifiée : calcul de l'ordre de grandeur de la part d'eau participant à la recharge.....</i>	<i>47</i>
<i>Illustration 23 : valeurs d'IDPR et coefficients d'infiltration associés.....</i>	<i>48</i>

<i>Illustration 24 : Estimation de la recharge vers les eaux souterraines, par sous-bassins versants, en mm</i>	49
<i>Illustration 25 : Schéma hydrogéologique de Marie Galante</i>	52
<i>Illustration 26 : Carte géologique synthétique de la Guyane française (B. Choubert, 1974, Y. Vernhet et al., 1992).</i>	60
<i>Illustration 27 : esquisse géologique et structurale de la Martinique, d'après Westercamp, 1990</i>	63
<i>Illustration 28 : histoire géologique de la Martinique (Andreieff et Al, 1988)</i>	64
<i>Illustration 29 : Principe de découpage en niveau des unités hydrogéologiques</i>	77
<i>Illustration 30 : Débit potentiel instantané par forages, pour les unités de niveau 1 (formations affleurantes).</i>	78
<i>Illustration 31 : Carte des unités régionales (avec le numéro de chaque UR), sur fond de la carte géologique au 1/50000^{ème}</i>	82
<i>Illustration 32 : Localisation des sources thermales et/ou minérales (en rouge) et des sources non thermales (en bleu), sur la carte géologique au 1/50000^{ème}</i>	83
<i>Illustration 33 : Cours d'eau pérennes (Source : DIREN)</i>	85
<i>Illustration 34 : Pluviométrie moyenne annuelle en Martinique (1915-2006) en mm/an</i> 89	
<i>Illustration 35 : Découpage de la Martinique en 14 Zones Pluviométriquement Homogènes</i>	90
<i>Illustration 36: Evapotranspiration moyenne annuelle en Martinique entre 1961 et 1980 en mm/an</i>	91
<i>Illustration 37 : Évolution de l'ETP en fonction de l'altitude en Martinique et à la Réunion</i> 92	
<i>Illustration 38 : Estimation du déficit d'écoulement de trois rivières de Martinique</i>	93
<i>Illustration 39 : Localisation des bassins versants (en jaune), des stations hydrométriques (en rouge) et des stations pluviométriques (en bleu)</i>	96
<i>Illustration 40 : Synthèse des résultats des modélisations TEMPO</i>	97
<i>Illustration 41 : Discrétisation spatiale puis agrégation de l'infiltration et du ruissellement à l'échelle des UR</i>	100
<i>Illustration 42: Principe du calcul de la pluie efficace</i>	101
<i>Illustration 43 : Schéma du deuxième réservoir</i>	102
<i>Illustration 44 : Schéma du troisième réservoir</i>	103
<i>Illustration 45 : Découpage de la Martinique en 24 Unités Régionales</i>	105
<i>Illustration 46 : Isohyètes, zones pluviométriquement homogènes et pluviomètres de référence.</i>	106
<i>Illustration 47 : Carte des Réserves Utiles maximale des sols</i>	107
<i>Illustration 48 : Variation des coefficients culturaux de la canne et de la banane au cours de l'année</i>	108

<i>Illustration 49 : contribution de la pente au ruissellement.....</i>	109
<i>Illustration 50 : Carte discrétisée des pentes de la Martinique.....</i>	109
<i>Illustration 51 : Valeurs par défaut du temps de transit moyen dans la nappe pour chaque UR.....</i>	110
<i>Illustration 52 : Définition du facteur de forme pour une UH.....</i>	111
<i>Illustration 53 : Facteur de forme de chaque UR.....</i>	111
<i>Illustration 54 : Débits moyens journaliers des prélèvements d'eau de surface.....</i>	113
<i>Illustration 55 : Répartition mensuelle théorique des débits prélevés au sein des UR22 et 23</i>	113
<i>Illustration 56 : Capture d'écran du simulateur numérique</i>	115
<i>Illustration 57: Localisation des points de mesures exploitables (hydrométrie et piézométrie)</i>	117
<i>Illustration 58 : Carte des coefficients de ruissellement.....</i>	118
<i>Illustration 59 : Jeu de paramètres calé</i>	119
<i>Illustration 60 : Carte de la pluie efficace moyenne annuelle (en mm).....</i>	120
<i>Illustration 61 : Bilan hydrologique moyen 1987-1997 calculé pour chaque UR (hors stocks)</i>	123
<i>Illustration 62: Résultats hydrologiques, par unité régionale (état actuel).....</i>	126
<i>Illustration 63 : Surface utilisable pour la réalisation de forages, par unité régionale et pour les différentes classes de forages.....</i>	127
<i>Illustration 64 : Nombre de forages potentiellement réalisables, volumes prélevés et impacts, par unité régionale.....</i>	128
<i>Illustration 65 : Variabilité spatiale de la pluie efficace par unité régionale</i>	129
<i>Illustration 66 : Variabilité spatiale de l'écoulement rapide, par unité régionale</i>	129
<i>Illustration 67 : Variabilité spatiale de l'infiltration, par unité régionale.....</i>	130
<i>Illustration 68 : Pourcentage de l'eau infiltrée s'écoulant directement en mer</i>	130
<i>Illustration 69 : Ressource en eau potentiellement exploitable en fonction du nombre de forages</i>	131
<i>Illustration 70 : Répartition des volumes prélevables par les classes de forages de 20 et 45 m³/h, selon les 4 grands secteurs géographiques de l'île</i>	132
<i>Illustration 71 : Conceptualisation du cycle de l'eau de la Martinique (état actuel)</i>	132
<i>Illustration 72 : Répartition de la ressource en eau souterraine potentiellement exploitable par unité hydrogéologique</i>	134
<i>Illustration 73 : Topographie de l'île de la Réunion (MNT 25 m) et répartition moyenne annuelle des précipitations (tracé des isohyètes de Météo France 1970-2009 et localisation des postes pluviométriques utilisés pour le tracé des isohyètes)</i>	139

<i>Illustration 74 : Carte hydrographique de la Réunion</i>	140
<i>Illustration 75 : Perspectives morpho-géologiques schématiques (Raunet, 1991)</i>	142
<i>Illustration 76 : Carte de localisation des nappes stratégiques</i>	146
<i>Illustration 77 : Modèle de Thornthwaite (1948)</i>	147
<i>Illustration 78 : Régions pluviométriques déterminées par Météo-France Réunion (2010)</i>	151
<i>Illustration 79 : Principe de distribution spatiale de la pluie en fonction des polygones de Thiessen et des isohyètes annuelles</i>	152
<i>Illustration 80 : Zonage thermométrique définie par Météo France Réunion</i>	154
<i>Illustration 81 : Zonage thermométrique issue de Météo France Réunion</i>	155
<i>Illustration 82 : Localisation des postes ETP (Météo-France)</i>	157
<i>Illustration 83 : Pondération des postes ETP sélectionnés</i>	157
<i>illustration 84: Altitude moyenne par maille</i>	159
<i>illustration 85 : Répartition des zones Ouest et Est</i>	159
<i>Illustration 86 : Carte des ETP moyennes annuelles calculées par mailles de 1 km²</i>	159
<i>Illustration 87 : Classes de sol issues de la carte pédologique du Cirad</i>	162
<i>Illustration 88 - Carte de la réserve utile du CIRAD</i>	163
<i>Illustration 89 - Carte simplifiée de la réserve utile</i>	164
<i>Illustration 90 - Bassins versants ayant fait l'objet de bilans (droite) ou modélisés (gauche)</i>	165
<i>Illustration 91 - Carte globale résultante des hypothèses effectuées sur les valeurs de RU</i>	165
<i>Illustration 92 - Carte de la pluie efficace moyenne</i>	166
<i>Illustration 93 - Masses d'eau souterraine définies dans le SDAGE Réunion</i>	167
<i>Illustration 94 - Moyenne annuelle de la pluie efficace par masse d'eau souterraine</i> .	168
<i>Illustration 95 - Résultat du calcul IDPR. Les zones rouges et bleues indiquent respectivement les zones majoritairement infiltrantes et ruisselantes</i>	170
<i>Illustration 96 - IDPR et pourcentage de répartition entre ruissellement et infiltration</i>	171
<i>Illustration 97- Classes d'IDPR choisies</i>	171
<i>Illustration 98 - Recharge estimée par le calcul de pluie efficace et par l'analyse de l'IDPR à l'échelle de l'île</i>	172
<i>Illustration 99 - Recharge annuelle moyenne par masses d'eau souterraine</i>	173
<i>Illustration 100 - Bilans obtenus en moyennant les résultats sur les masses d'eau</i> ...	174
<i>Illustration 101 - Variation de la pluie efficace liée à une augmentation de l'ETP de 10% sur l'ensemble de l'île</i>	175

1. PRESENTATION GENERALE

1.1. OBJECTIF DU PROJET

L'objectif du projet « **Explore 2070** » consiste, à partir de scénarios climatiques, démographiques et socio-économiques variés, d'**élaborer et d'évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique** face à l'évolution des hydrosystèmes et des milieux côtiers à l'**horizon 2050-2070**, pour la métropole et les départements d'outre-mer. A l'aide d'une approche systémique, il s'agit de **concevoir des stratégies d'adaptation** permettant d'anticiper les défis majeurs du changement climatique et d'élaborer, pour chacune d'elles, une **feuille de route** visant à minimiser les risques et les coûts associés (financiers, humains, environnementaux).

1.2. RAPPEL DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE

Par suite des délais d'études relativement courts vis-à-vis du temps nécessaire à la construction d'un modèle hydrodynamique, le groupement BRGM/ ARMINES a proposé, dans le cadre de sa contribution au projet Explore 2070 :

- d'utiliser les modèles hydrodynamiques maillés, déjà existants et calés sur la période actuelle,
- de compléter ces évaluations dans le socle, le karst, les zones fortement plissées et/ ou les aquifères alluviaux d'extension limitée par quelques modélisations globales pluie-débit-niveau piézométrique déjà réalisées avec des logiciels tels que GARDENIA ou TEMPO du BRGM.
- de quantifier, par ailleurs, la ressource renouvelable sur l'ensemble du territoire à partir notamment, des données de pluie efficace et de l'IDPR¹

1.3. CONTENU DU PRESENT RAPPORT

¹ IDPR : Indice de Développement et de Persistance des Réseaux

Si la méthodologie proposée paraissait pouvoir s'appliquer sur l'ensemble du territoire métropolitain, sa mise en application allait rapidement s'avérer impossible ou dénuée de sens dans les Départements d'Outre-Mer.

En effet trois obstacles majeurs ont rapidement été recensés :

- hormis le modèle maillé de Grande Terre en Guadeloupe (milieu sédimentaire), il n'existe pas de modèle hydrodynamique d'extension significative dans les DOM,
- les hydrosystèmes des îles volcaniques globalement sont mal connus en raison de leur complexité géologique
- la quasi absence de données d'entrée (climatiques) des modèles au niveau des DROM, données qui se limitent à :
 - un point à terre à la Réunion,
 - deux points en mer aux Antilles.

A ce manque de données s'ajoute l'extrême variabilité spatiale des paramètres climatiques (notamment la pluie) au droit de ces départements.

Sur la base de ces constats il est vite apparu qu'il ne serait pas possible de fournir les simulations ou scénarios attendus.

Afin de répondre au mieux à la demande, il a été décidé de dresser un bilan des ressources en eau souterraines de ces régions puis, d'évaluer qualitativement les impacts potentiels d'une élévation globale de la température et/ou de l'ETP.

Le niveau de connaissance et la problématique des ressources en eau sont très variables d'une région à l'autre. Pour certaines régions, les détails de la partie ressources ont été développés dans l'optique de fournir la maximum d'information au lot 8 qui traite de l'adaptation.

Les régions abordées sont au nombre de 4 (Guadeloupe, Guyane, Martinique, Réunion), Mayotte n'étant pas, lors de l'appel d'offre, encore département.

2. LA GUADELOUPE

La Guadeloupe est située à proximité du tropique du Cancer et par 61° 15' de longitude Ouest. Elle offre, sur une superficie réduite (1 438 km²), une grande diversité de paysages et de formes en relation avec ses caractéristiques géologiques. D'une superficie de 556 km², la Grande-Terre est une île à substratum calcaire et à relief tabulaire. Elle culmine à 135 m au Morne Escade dans les « Grands Fonds ». La Basse-Terre, île montagneuse d'origine volcanique pour l'essentiel, culmine à 1 467 m à la Soufrière. Les Dépendances (les îles voisines de la Guadeloupe) s'étendent sur 266 km² et reflètent la diversité structurale des îles principales : les Saintes, volcaniques, s'apparentent à la Basse-Terre, la Désirade et surtout Marie-Galante à la Grande-Terre. Les Dépendances du Nord (Saint-Martin et Saint-Barthélemy) juxtaposent, de façon complexe car imbriquées, les formations sédimentaires et volcaniques.

Les besoins en eau de la Guadeloupe étaient de 43 Mm³/an en 2000. Ils sont estimés à 62 Mm³/an à l'horizon 2010. L'alimentation en eau potable constitue le principal poste de consommation avec près de 75 % du total, soit environ 30 Mm³ ou encore 211 l/hab./j (1996). L'augmentation de la consommation en eau potable semble relativement continue (de l'ordre de + 2,3 % l'an depuis 1992). La consommation d'eau d'irrigation varie principalement en fonction de la pluviosité. L'eau destinée à l'industrie représente environ 10 % des besoins. L'essentiel des besoins en eau est assuré par des prises d'eau en rivière et par le captage des sources en Basse-Terre et, dans une plus faible mesure, par des forages : Grande-Terre (13 900 m³/j), Marie-Galante (1 524 m³/j), Saint-Martin (200 m³/j). L'alimentation en eau de l'île de la Désirade - est réalisée à partir des ressources de la Guadeloupe transférées par une conduite sous-marine de 15 km de long depuis 1991.

2.1. GRANDE TERRE

2.1.1. GENERALITES

La Grande-Terre est constituée de roches calcaires témoins d'un vaste récif plio-pléistocène. Le socle, probablement volcanique non affleurant, n'a pas été à ce jour atteint par forage. Les plus anciens dépôts connus sont les calcaires riches en foraminifères planctoniques du Pliocène inférieur, carottés au forage de la Plaine de la Simonière, dans les plateaux de l'Est et au-dessus desquels s'est

déposée la série carbonatée plio-pléistocène épaisse de 120 m à laquelle appartiennent tous les terrains affleurant de la Grande-Terre. Cette série est composée de 90 m de calcaires de plate-forme à nodules algaires (rhodolites), bioclastes divers et foraminifères benthiques dans lesquels s'intercalent des niveaux volcano-sédimentaires parfois épais de 10 m qui marquent les périodes d'activité des appareils volcaniques pliocènes du Nord de la Basse-Terre. Après le dépôt de l'avant-dernier et du plus étendu de ces niveaux, le Nord de la Grande-Terre a été momentanément émergé à deux reprises. Les calcaires à rhodolites ont été brutalement remplacés au Pléistocène inférieur par des calcaires à polypiers parfois récifaux qui constituent les derniers 30 m de la série. Le soulèvement de l'île au Pléistocène inférieur a entraîné l'émersion définitive des Grands Fonds qui s'est fracturée suivant une direction N 130°E. L'émersion de la Grande-Terre s'est poursuivie ensuite de façon plus homogène par le soulèvement et le basculement vers l'Ouest - Nord-Ouest. Cette deuxième phase d'émersion a entraîné l'apparition d'une fracturation N 40° E qui s'est combinée aux fractures précédentes pour former le complexe réseau d'accidents qui débite la Grande-Terre. De fait la Grande-Terre est composée de quatre ensembles morphologiques et structuraux principaux (Illustration 1) : les Plateaux du Nord, les Plateaux de l'Est, les Grands Fonds et la Plaine de Grippon.

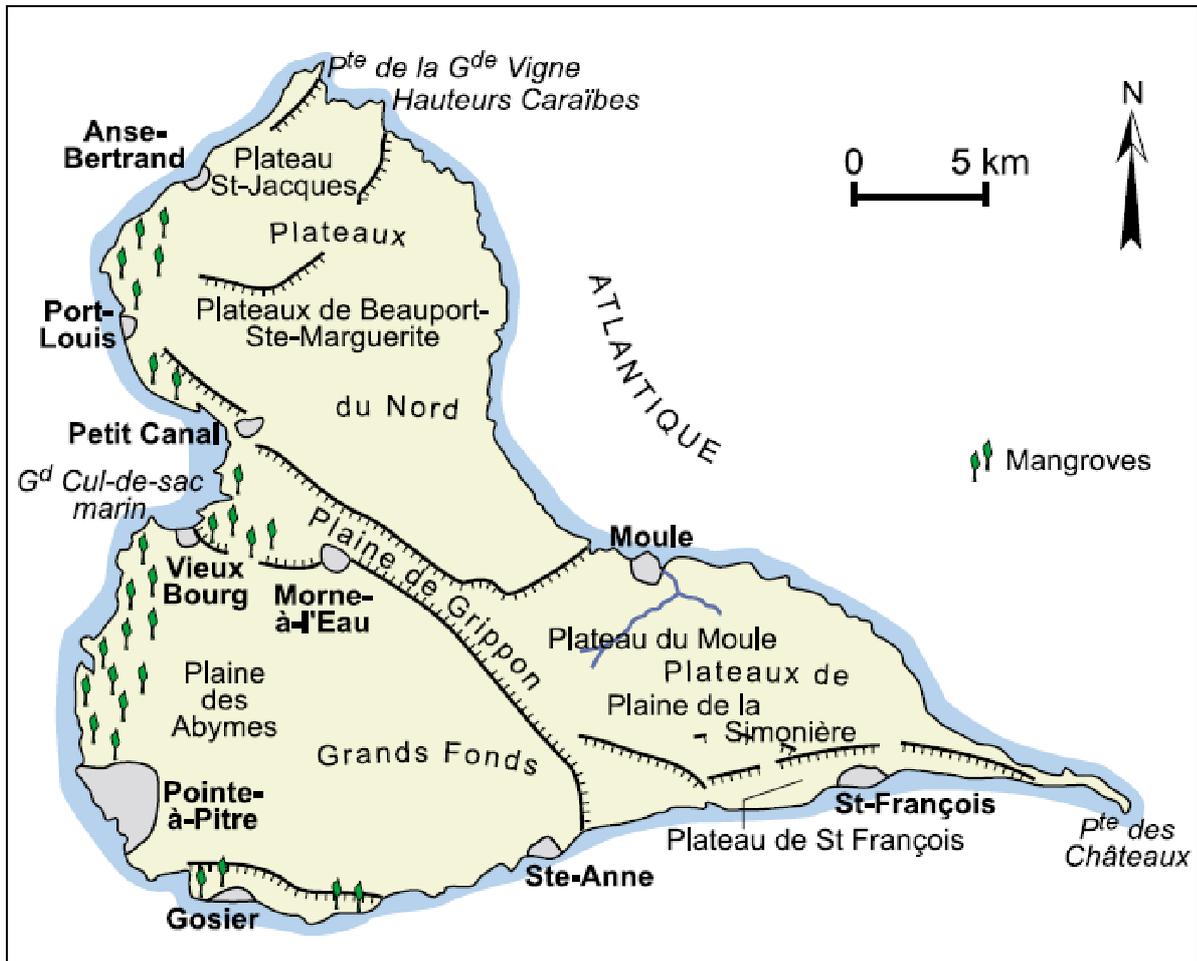


Illustration 1 : Ensembles morphologiques et structuraux principaux de la Grande Terre (Guadeloupe)

A la demande de la DIREN et du Conseil Régional de Guadeloupe, et dans le cadre de ses actions de service public, le BRGM a réalisé en 2006 un modèle de simulation des écoulements souterrains de Grande-Terre en Guadeloupe.

Il s'agit d'un modèle à mailles carrées de taille identique (20355 mailles de 200 m de côté) tridimensionnel avec prise en compte d'un biseau salé. Il a été construit avec le code de calcul aux volumes finis MARTHE du BRGM, en mode diphasique. Il intègre donc une interface mobile eau douce – eau salée dont l'évolution est calculée à partir des relations hydrodynamiques entre les phases « eau douce » et « eau salées » décrites en bibliographie.

Ce modèle a été élaboré sur la base des données hydrogéologiques disponibles au 31/12/2005. Certaines de ces données ce sont avérées incomplètes (en particulier : débits de prélèvements,

géométrie et position du substratum, position de l'interface eau douce/eau salée) ce qui a conduit à la prise en compte d'hypothèses pour la représentation dans le modèle des paramètres correspondants.

Le modèle a été calé sur une période de 20 ans (1985-2005) sur un réseau de 51 points d'eau de référence dont 46 ont une chronique suffisamment longue et représentative du comportement de la nappe pour permettre son calage. Les calculs hydrodynamiques (calcul de la charge hydraulique dans chaque maille de la grille) ont été réalisés au pas mensuel. Les calculs des bilans hydro climatiques (calcul de la recharge de la nappe) ont été faits au pas journalier.

Dans le cadre de la convention ONEMA BRGM de 2011, l'influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salé des aquifères côtiers des DROM/COM a fait l'objet d'une étude en s'appuyant sur ce modèle de Grande Terre de la Guadeloupe.

Le présent chapitre se propose :

- de présenter la construction et le calage de ce modèle,
- de décrire l'impact du changement climatique, surélévation du niveau marin de 1 mètre, sur les niveaux de l'aquifère afin de transposer ces résultats à d'autres sites similaires de la métropole ou des DOM,
- d'introduire le bilan hydrogéologique de la Guadeloupe dont Grande Terre est une des composantes, ne serait ce que par sa spécificité.

2.1.2. CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE : RAPPEL SUR LES DONNEES DISPONIBLES ET LES HYPOTHESES RETENUES

2.1.2.1. GEOMETRIE DE L'AQUIFERE

La géométrie de l'aquifère est représentée par :

- la topographie du système : les données utilisées sont celles du MNT au pas de 10 m. Etant donné la superficie à modéliser (750 km²), le pas de la grille utilisé pour la modélisation a été fixé à 200 m, ce pas correspond à la taille des mailles dans lesquelles est fait un calcul hydrodynamique. Le MNT a donc été moyenné dans chaque maille de la grille en surface

pour établir la topographie du système à l'échelle retenue pour le modèle (Illustration 2);

- les limites inférieures (substratum) des formations géologiques jouant un rôle hydraulique.

Le modèle géologique retenu comprend trois unités qui sont de bas en haut :

- o les calcaires « inférieurs » ;
- o un niveau volcano-sédimentaire « supérieur » peu perméable et présent ponctuellement ;
- o les calcaires « supérieurs ».

En l'absence du niveau volcano-sédimentaire, les deux ensembles calcaires sont en contact direct et forment un unique aquifère appelé « formations carbonatées ».

La position du substratum des formations carbonatées n'est pas clairement identifiée. Celui-ci est donc représenté dans le modèle sur la base d'une hypothèse qui a consisté à le placer à la cote - 130 m NGG sous la surface de l'île, soit à une profondeur de 30 m en dessous de la profondeur maximale de l'interface eau douce – eau salée définie d'après la carte hydrogéologique de Grande-Terre (Cottez et al, 1972).

L'Illustration 4 représente un exemple d'une coupe verticale Ouest-Est du modèle montrant l'agencement des différentes unités.

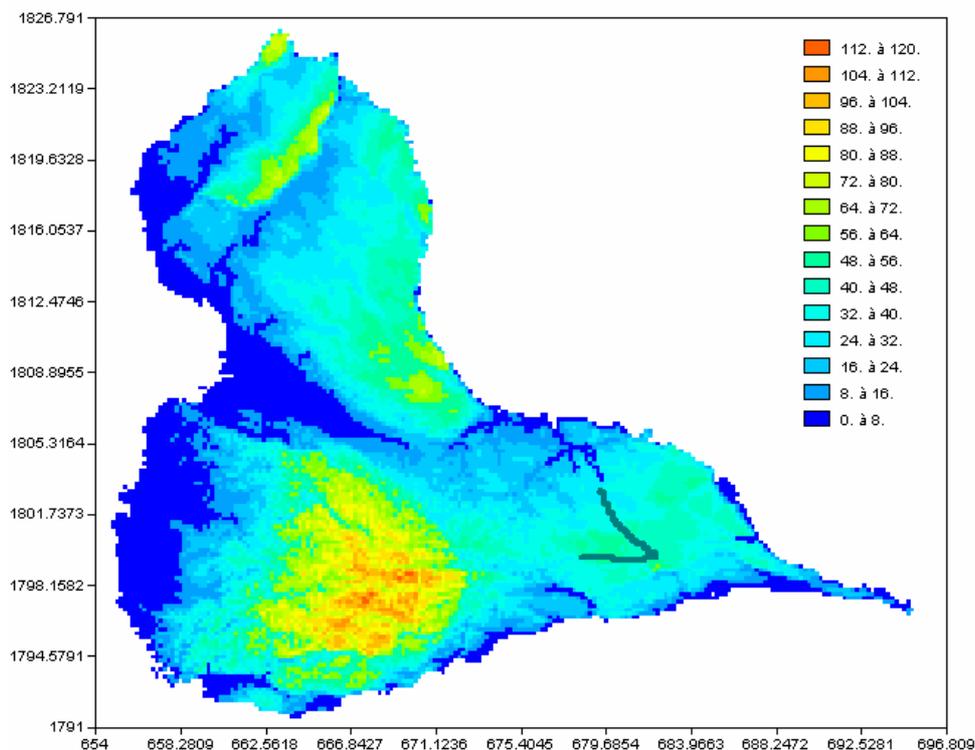


Illustration 2 : Extension latérale et topographie du modèle à la grille au pas de 200 m (m NGG)

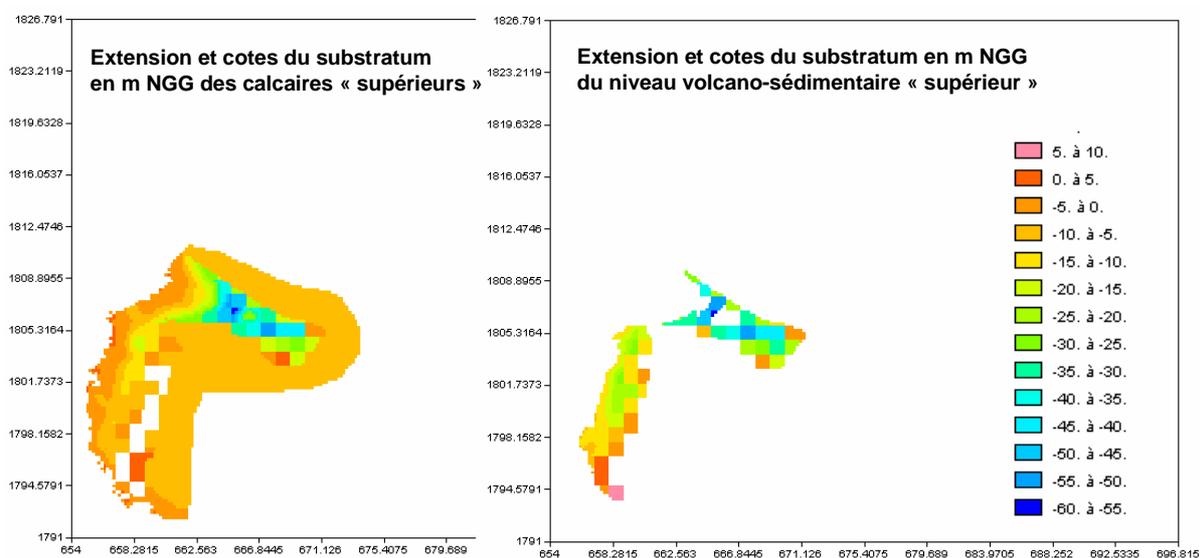


Illustration 3 : Extension et côtes du substratum des calcaires supérieurs et du niveau volcano-sédimentaire.

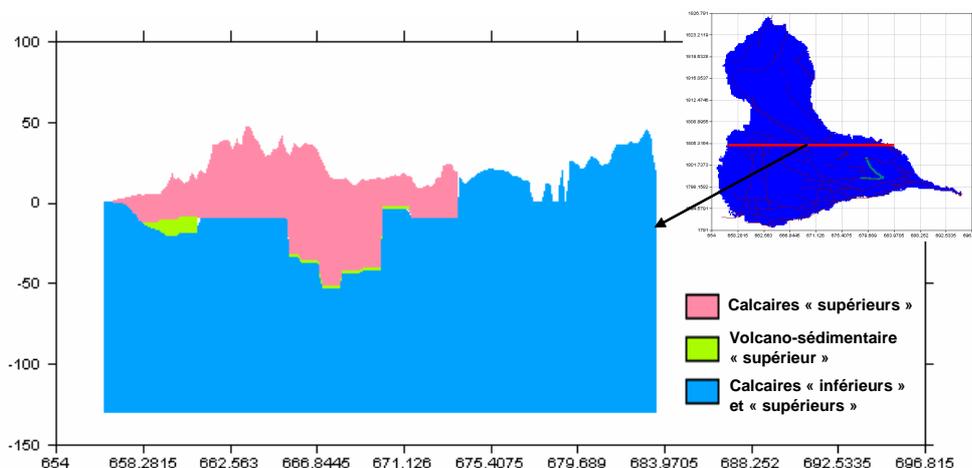


Illustration 4 : Exemple de profil vertical Ouest-Est du modèle

2.1.2.2. CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE

Dans le modèle trois types de conditions aux limites sont retenus (Illustration 5) :

- Une limite à potentiel imposé correspondant au niveau de la mer (charge égale à 0 m) sur le pourtour littoral ;
- Une limite étanche dans la partie Est du modèle, identifiée à partir d'observations piézométriques et de résultats d'essais de pompage ;
- Des cotes de débordement sur les mailles traversées par des rivières susceptibles de drainer la nappe dans les zones de débordement identifiées

2.1.2.3. PRELEVEMENTS

Ces derniers concernent principalement les prélèvements AEP, ils sont de l'ordre de 4 millions de m³ par an avec une tendance globale à la diminution. Les prélèvements industriels exploités par trois sociétés sont de l'ordre de 1000 à 10000 fois plus faibles que les prélèvements AEP. Les prélèvements agricoles sont moins bien recensés : seuls les ouvrages localisés ont été retenus, leurs débits estimés varient entre 10000 et 100000 m³ par an.

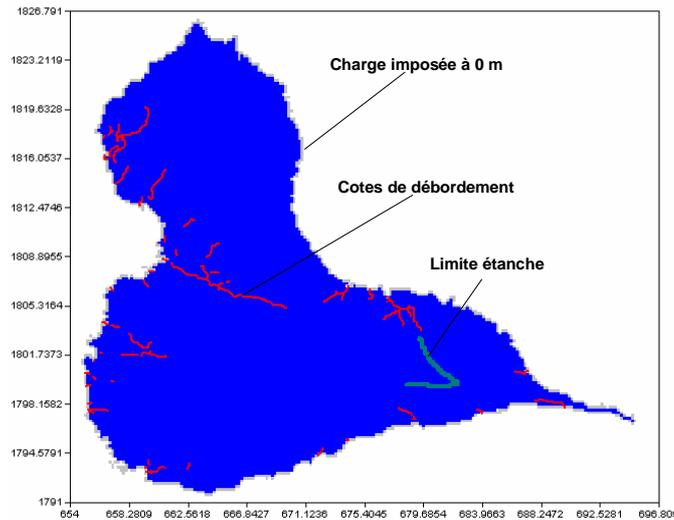


Illustration 5 : Conditions aux limites du modèle

2.1.2.4. ALIMENTATION DU SYSTEME

L'alimentation en eau du système aquifère dépend de la fraction de la pluie efficace qui va atteindre la nappe : l'infiltration réelle.

La pluie et l'ETP sont des données spatialisées, 4 zones dites « zones météo » pour la pluie et l'ETP ont été définies :

- une zone correspondant aux plateaux du Nord avec comme stations de référence Port-Louis Beauplan pour la pluie et Godet pour l'ETP ;
- une zone pour les plateaux de l'Est avec comme stations de référence Le Moule Monplaisir pour la pluie et Gardel pour l'ETP ;
- une zone pour les Grands Fonds et la plaine des Abymes avec comme station de référence Les Abymes Raizet pour la pluie et l'ETP ;
- une zone pour la plaine des Grippons avec comme stations de référence Morne à l'Eau Blanchet pour la pluie et Godet pour l'ETP.

L'Illustration 6 précise le zonage de la pluie et de l'ETP.

2.1.2.5. RESERVE FACILEMENT UTILISABLE (RFU)

Une RFU de 50 mm a été retenue sur tout le secteur d'étude puis ajustée au cours du calage du modèle (cf. chapitre 3.3.3).

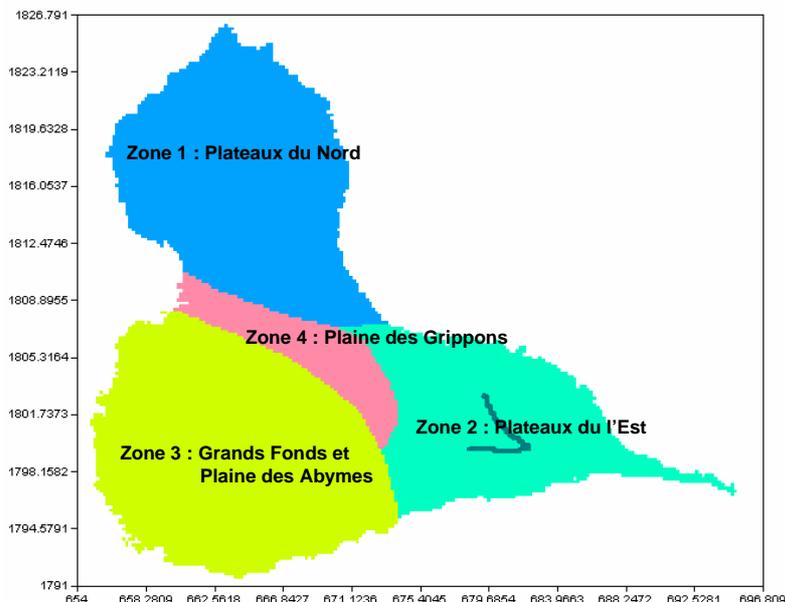


Illustration 6 : Zones de données météo (Pluie, ETP)

2.1.2.6. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE

Les paramètres nécessaires pour le calcul des quantités d'eau transitant dans l'aquifère sont d'une part, la transmissivité, et d'autre part, le coefficient d'emmagasinement qui pour une nappe libre est l'équivalent de la porosité efficace et pour une nappe captive est fonction de la compressibilité de l'eau et de la matrice poreuse ainsi que de l'épaisseur de la couche aquifère.

Des données relatives à ces différents paramètres ont pu être mesurées ponctuellement et ont servi pour définir des zones initiales de perméabilités et d'emmagasinement homogènes. Néanmoins, les perméabilités et les emmagasinement sont réajustés par calage sur les variations piézométriques. Les valeurs des perméabilités et emmagasinement calés obtenus sont présentés dans le chapitre 2.1.3.

2.1.2.7. PIEZOMETRIE DE REFERENCE

La carte piézométrique de référence retenue correspond à celle du mois de septembre 1989 (cf.

Illustration 7)

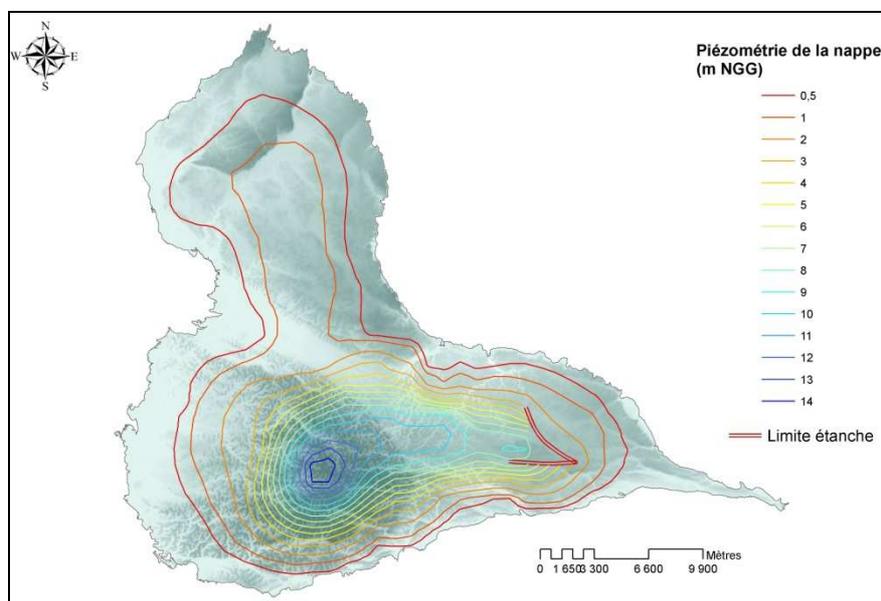


Illustration 7 : Carte piézométrique de référence – septembre 1989

2.1.2.8. POINTS D'EAU DE REFERENCE

Les points d'eau de référence, au nombre de 46, recouvrent l'ensemble de la zone modélisée excepté le sud-ouest correspondant à la plaine des Abymes.

2.1.2.9. INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALEE

La carte de référence représentant la position verticale de l'interface eau douce – eau salée est issue des travaux de S. Cottez dans les années 1970

n'a pas pu être utilisée et le calage du modèle a dû être affiné à l'aide de cartes de position de l'interface issues de calculs.

2.1.3. CALAGE DU MODELE NUMERIQUE

2.1.3.1. METHODOLOGIE DU CALAGE

La phase de calage d'un modèle hydrogéologique consiste à ajuster deux types de paramètres :

- les paramètres propres au fonctionnement de l'aquifère (zone saturée) qui sont la perméabilité et l'emmagasinement ;
- les paramètres déterminant l'infiltration à travers la zone non saturée selon le schéma GARDÉNIA du BRGM qui sont d'une part, la RDE (Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration) pour les premiers mètres du sol (équivalent de la RFU utilisée par les agronomes) et, d'autre part, deux paramètres permettant la répartition en un écoulement rapide (ruissellement) et un écoulement lent (percolation vers la nappe) qui sont définis par le temps de demi-percolation (TPERC) et la hauteur d'équi-ruissellement-percolation (NRUIP).

Une première évaluation de ces paramètres a été réalisée à l'aide du logiciel GARDENIA ; elle a permis de préparer leur calage dans MARTHE. Cette évaluation a été réalisée sur la base de données piézométriques, les données de débits de la ravine des Coudes n'ayant pas pu être utilisées car trop imprécises.

2.1.3.2. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE

Des zones de champ de perméabilité et d'emmagasinement approximatives ont été définies à partir des données ponctuelles obtenues par essai de pompage, mais c'est essentiellement le processus de calage sur les fluctuations piézométriques qui a permis d'ajuster les valeurs et la répartition dans l'espace de la perméabilité et de l'emmagasinement libre de l'aquifère. Les résultats du calage de la perméabilité et de l'emmagasinement sont présentés dans le chapitre 2.1.3.7.

2.1.3.3. PARAMETRES POUR LE CALCUL DE LA RECHARGE DE LA NAPPE

Le calcul de la recharge de la nappe est basé sur un calcul de bilan hydro-climatique au pas journalier selon le schéma de GARDÉNIA (Thiery, 2003) et intégré au code MARTHE.

Il nécessite l'intégration dans le modèle :

- des zones de pluies et d'ETP retenues ;
- de zones de sol sur lesquelles est définie la RDE ;
- de zones de répartition des deux paramètres de l'écoulement en deux composantes TPERC et NRUIP.

Il se base sur le principe d'un modèle de réservoirs indiquant la répartition des écoulements depuis les premiers centimètres du sol jusqu'à la nappe.

Le calage de l'infiltration consiste à ajuster les trois paramètres RDE, TPERC et NRUIP (paramètres spatialisés) pour reproduire le plus précisément possible les variations temporelles de la piézométrie sur la période de calage retenue (1985-2005).

2.1.3.4. CALCUL EN MODE DIPHASIQUE

La méthode utilisée pour représenter dans le modèle les relations entre l'eau douce de la nappe et l'eau salée environnante est une approche multiphasique où il est considéré :

- que les deux fluides ne sont pas miscibles ;
- que l'interface entre la zone d'eau douce et la zone d'eau salée est abrupte ;
- que les pressions des deux phases sont reliées par une loi analogue à une loi de rétention qui est fonction de la saturation en eau salée, de la densité de l'eau salée et de la dimension verticale de la maille du modèle.

Dans le cas général des nappes libres où la phase air intervient, cette dernière est prise à pression atmosphérique constante ce qui revient à considérer uniquement les variations de pression des deux phases liquides.

Une description détaillée de cette approche est décrite dans « Saltwater intrusion modelling with an efficient multiphase approach: Theory and several field applications », (Thiery 2005).

2.1.3.5. CALAGE DU MODELE NUMERIQUE

Le processus de calage a consisté à faire reproduire par le modèle les fluctuations piézométriques de la nappe par ajustement des paramètres hydrodynamiques et des paramètres de calcul de la recharge de l'aquifère. Au cours de la modélisation, les calculs hydrodynamiques sont réalisés au pas de temps mensuel.

2.1.3.6. RESULTATS DU CALAGE : COMPARAISON DES PIEZOMETRIES OBSERVEES ET SIMULEES

Le calage du modèle a été réalisé en différentes étapes qui ont permis de soulever des problèmes et d'y remédier au fur et à mesure de l'avancement du calage :

a) Calage en régime transitoire et en mode monophasique

- étape 1 : calage des paramètres du modèle en prenant comme carte piézométrique initiale, la carte de septembre 1989 qui est à la fois la mieux renseignée et la plus précise quant à la géométrie de la nappe
- étape 2 : calage des paramètres du modèle en prenant comme carte piézométrique de référence la carte de mars 1996

Un état piézométrique moyen a été calculé par le modèle dans une première étape. Ce résultat, considéré comme état piézométrique moyen, a servi de piézométrie de référence pour la réalisation d'un second calage

b) Calage en régime transitoire et en mode diphasique : introduction des données relatives à la position de l'interface eau douce – eau salée

L'utilisation de la carte de position de l'interface eau douce/eau salée proposée par S. Cottez en 1972 n'ayant pu être utilisée en raison de son manque de précision, différentes solutions palliatives ont été testées pour représenter la profondeur de l'interface et améliorer ainsi le calage. Les charges restituées par le modèle sont correctement corrélées avec les chroniques observées, à l'exception de quelques piézomètres qui présentent, soit des «étiages » moins importants que ceux observés et qui pourraient s'expliquer par une sous-estimation des pompages dans le modèle, soit un léger déphasage pour les piézomètres proches du pourtour littoral notamment dans les plateaux de l'Est.

Les résultats du calage obtenus sur les 46 piézomètres de référence sont donnés dans les annexes 4 à 7 du rapport pour chacun des secteurs : Grands Fonds, Plaine des Grippons, Plateaux du Nord et Plateaux de l'Est. Dans ce résumé seuls quelques résultats sont donnés à titre d'exemples (Illustration 9).

L'Illustration 8 ci-après montre la piézométrie simulée des hautes eaux de septembre 1989.

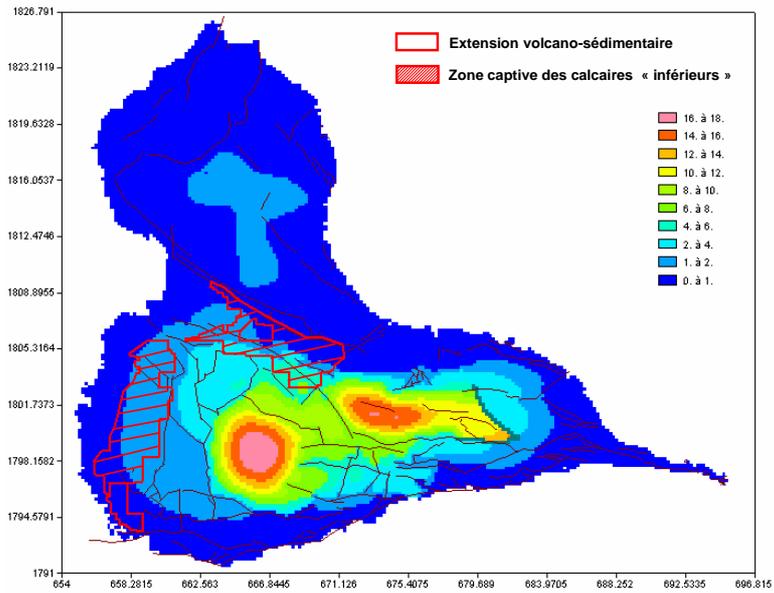


Illustration 8 : Carte des charges simulées pour les hautes eaux de septembre 1989 (m NGG) et délimitation de la zone de captivité de la nappe

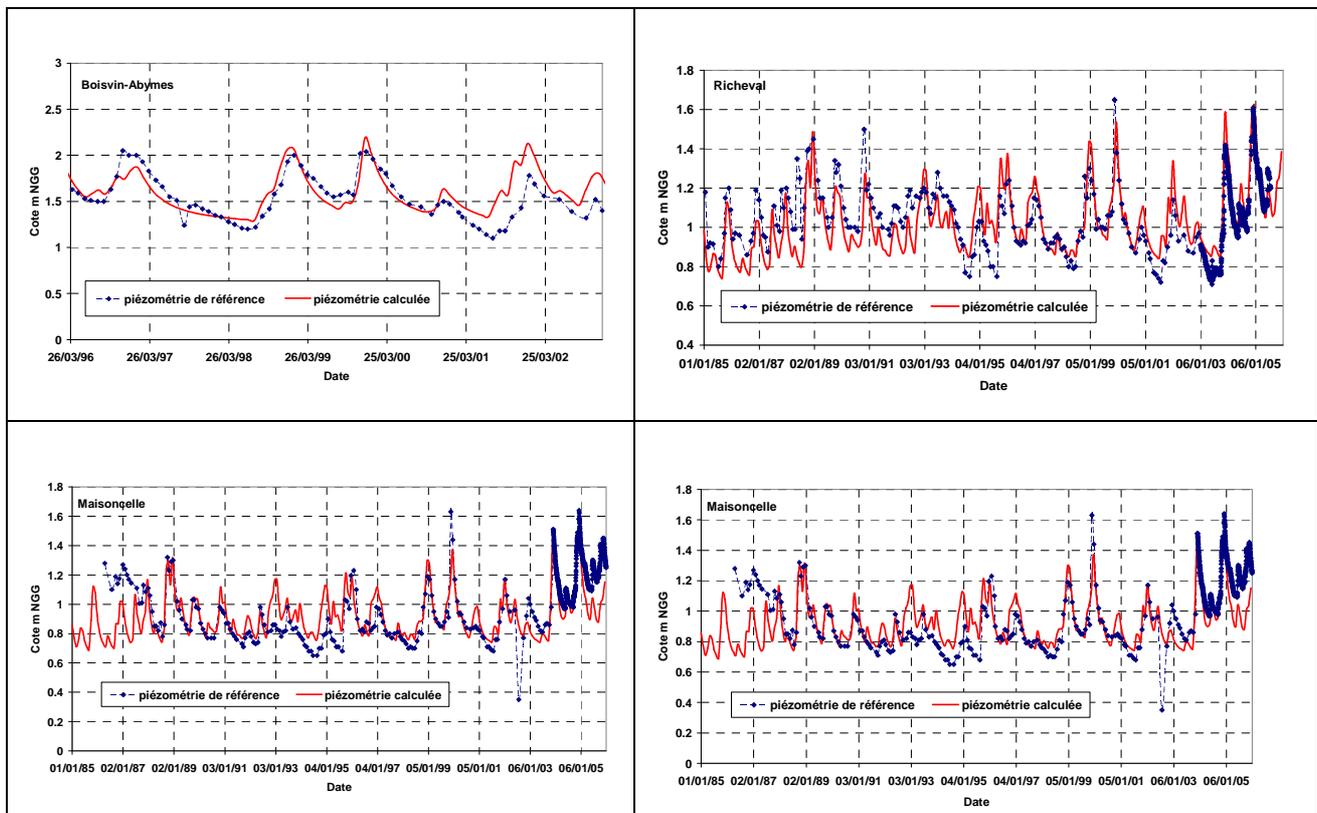


Illustration 9 : Calage de la piézométrie des différents secteurs : Grands Fonds, Plaine des Grippons, Plateaux du Nord, Plateaux de l'Est

2.1.3.7. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Le calage sur les observations piézométriques permet d'accéder à l'ordre de grandeur des paramètres physiques du système aquifère (perméabilité ; coefficient d'emmagasinement ; paramètres de la recharge) et d'appréhender leur possible répartition. Bien sûr, les résultats obtenus, qui sont le fruit d'un calage mathématique, ne peuvent rendre compte de la variabilité du milieu naturel dans le détail générant ainsi des écarts avec la réalité.

a) Répartition des perméabilités calculées

L'illustration 10 montre la répartition du champ de perméabilité obtenu suite au processus de calage du modèle pour les formations carbonatées. Les perméabilités varient entre 5.10^{-6} m/s pour la plus faible (en zone centrale du modèle) jusqu'à 5.10^{-1} m/s pour la plus forte (Nord-ouest), avec de nombreuses zones ayant une perméabilité comprise entre 1.10^{-4} et 1.10^{-2} m/s. La perméabilité du

niveau volcano-sédimentaire a été fixée à 10^{-6} m/s.

b) Répartition de l’emmagasinement libre

L’Illustration 10 montre la répartition du champ d’emmagasinement libre correspondant au paramètre de la porosité à saturation pour le calcul en diphasique. Les valeurs sont comprises entre 15 et 30 % pour une large zone centrale comprenant le secteur des Grands-Fonds, la Plaine des Grippons, le sud des Plateaux du Nord, la zone centrale des Plateaux de l’Est et sur laquelle existe un réseau de failles assez développé. Ailleurs, il est plus faible et varie entre 0.5 et 5 %.

Dans les zones où coexistent deux ou trois couches et où la nappe est captive, un emmagasinement spécifique, uniforme et fixé à 10^{-4} m⁻¹ a été pris en compte.

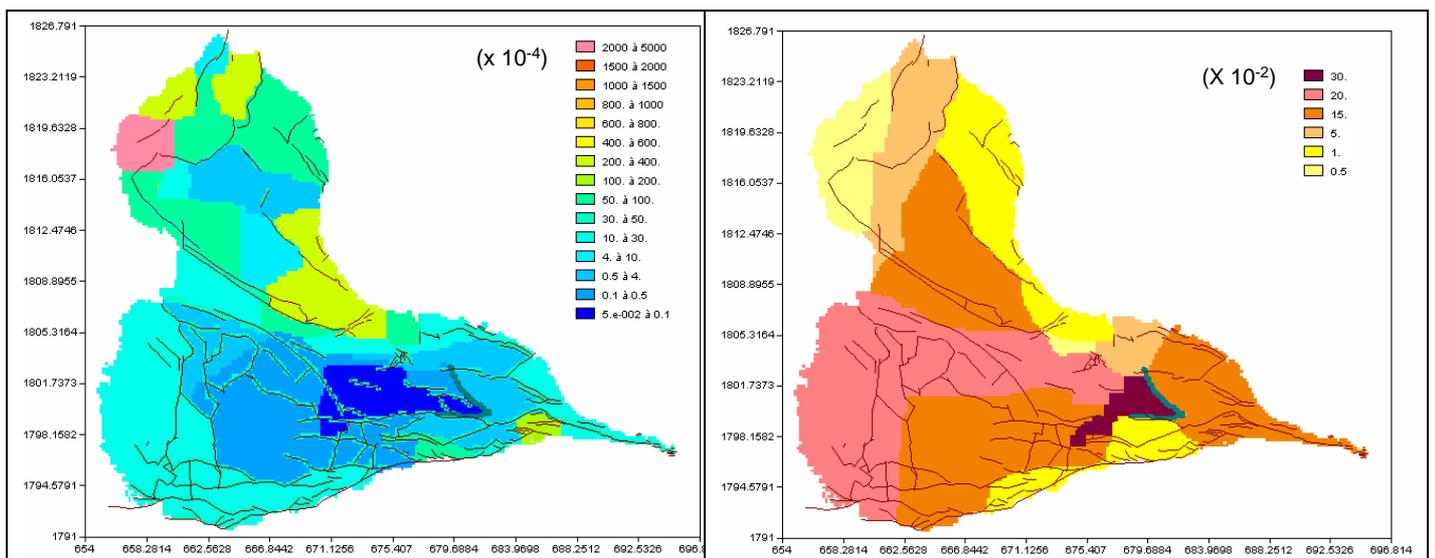


Illustration 10 : Répartition des perméabilités (gauche) et du coefficient d’emmagasinement (droite) obtenues par calage

2.1.3.8. PARAMETRES DE CALCUL DE L’INFILTRATION

L’Illustration 11 montre le calage des paramètres de calcul de la recharge de l’aquifère, c’est à dire la répartition spatiale de la Réserve Disponible pour l’Evapotranspiration (RDE), du paramètre de répartition entre le ruissellement et la percolation (NRUIP) et du temps de demi percolation (TPERC).

Pour cette application, la RDE a été fixée à 60 mm dans le secteur des Grands-Fonds, et 40 mm dans les Plateaux de l'Est, la Plaine des Grippons et les Plateaux du Nord, excepté une zone à 5 mm à l'extrémité nord. Sa valeur est dans l'ensemble proche de celle définie par l'INRA (entre 50 et 85 mm d'après le rapport BRGM/RP-54709-FR). La hauteur d'équi-ruisselement percolation varie entre 30 et 300 mm ; on rappelle que plus la valeur du NRUIP est élevée, plus l'infiltration est importante. Le temps de demi percolation varie entre 3 et 30 jours, les plus fortes valeurs correspondent soit à des zones où l'épaisseur non saturée est importante, soit à des zones moins perméables et donc avec un temps de transfert à la nappe plus long.

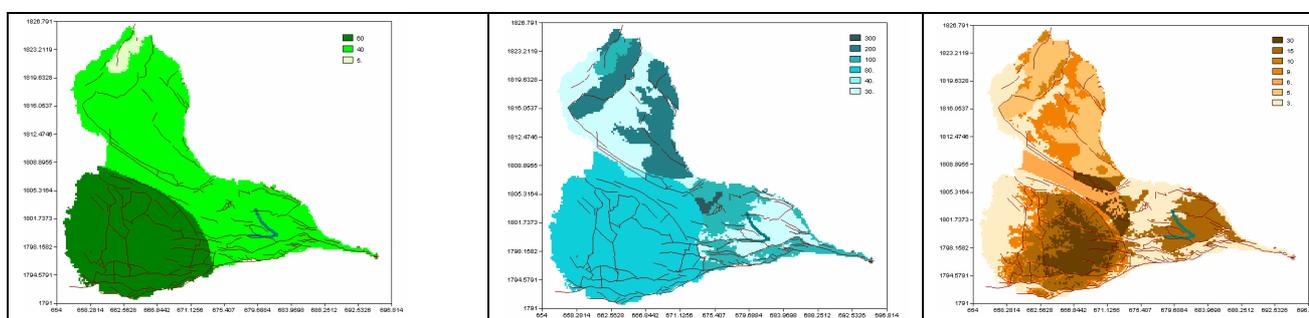


Illustration 11 : Zonation de la Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration (mm), de la hauteur d'équi-ruisselement percolation (mm) et du temps de demi-percolation (jours)

2.1.3.9. FLUCTUATIONS DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALEE

On peut donc distinguer deux types de comportement de l'interface eau douce – eau salée en Grande-Terre :

- pour les piézomètres se situant dans des zones à forte densité de fractures où la porosité efficace (ou emmagasinement libre) est importante (de l'ordre de 15 à 30% d'après le calage du modèle), les variations de position de l'interface sont atténuées par rapport à celles de la piézométrie ; le système est fortement inertiel ;
- pour les piézomètres situés à proximité du pourtour littoral ou dans des zones à densité de fracture moindre (porosité de l'ordre de 1 à 5%), l'interface évolue inversement à la piézométrie.

Illustration 12 montre la profondeur de l'interface calculée pour la période de hautes eaux de

septembre 1989. Lorsque cette dernière est en dessous de -130 m (cote du substratum du modèle), cela signifie que la couche est saturée en eau douce.

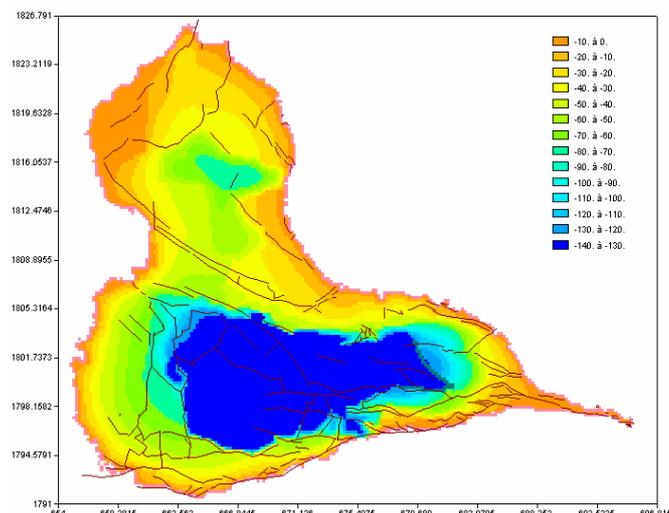


Illustration 12 : Profondeur calculée de l'interface eau douce-eau salée (m NGG)- Sept. 1989

2.1.3.10. RESULTATS DES BILANS HYDRODYNAMIQUES

Le modèle calé permet de calculer des bilans hydrodynamiques et d'analyser la réaction de l'aquifère aux différentes sollicitations externes que sont l'infiltration, les prélèvements, les débordements par les cours d'eau, les entrées et sorties d'eau par les limites du modèle. Il permet ainsi d'appréhender le fonctionnement de l'aquifère à travers ses fonctions de stockage et de déstockage. Afin de mieux visualiser le comportement de la nappe, l'analyse des bilans d'eau de l'aquifère de Grande-Terre a été fait pour chacune des grandes unités structurales : Grands-Fonds, Plaine des Grippons, Plateaux du Nord, Plateaux de l'Est (Illustration 13).

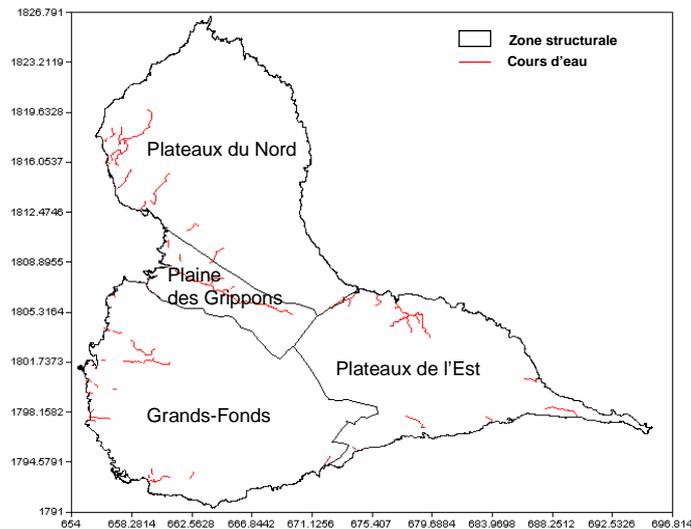


Illustration 13 : Définition des zones de bilans hydrodynamiques

L'analyse des bilans hydrodynamiques permet de contrôler et de quantifier la part de chacune des composantes du bilan que sont l'infiltration, les prélèvements, les débits entrants ou sortants par les limites du modèle, les débordements et les périodes de stockage ou déstockage d'eau de l'aquifère. Elle montre que **la recharge globale atteint $8.10^8 \text{ m}^3/\text{an}$ et que les débits d'exploitation en Grande-Terre sont largement inférieurs à cette recharge (maximum 5 % de la recharge).**

2.1.3.11. IMPACT DE L'ELEVATION DE LA MER SUR LE BISEAU SALE

Dans le cadre de la convention ONEMA BRGM de 2011, une modélisation de l'effet de remontée de niveau marin au niveau de l'aquifère de Grande Terre en Guadeloupe a ainsi été réalisé à l'aide de ce modèle maillé.

Hypothèses de modélisation

Paramètres inchangés

Les paramètres caractéristiques de l'aquifère (dimension, topographie, substratum, perméabilité, porosité, interface eau douce-eau salée...) restent identiques au modèle en régime transitoire de 2007.

Infiltration moyenne/zone de sol

Dans le modèle en régime transitoire de 2007, l'infiltration est calculée quotidiennement à partir des

données météo de 1985 à 2005 par le module « calcul hydroclimatique » existant dans Marthe. Dans le modèle en régime permanent, la moyenne de l'infiltration calculée de 1985 à 2005 est imposée par zone de sol,

Débit moyen / ouvrage, à partir des historiques de prélèvements

Dans le modèle en régime transitoire de 2007, les débits prélevés sont imposés mensuellement de 1985 à 2005 en chaque point de forage recensé. Dans le modèle en régime permanent, la moyenne des débits de 1985 à 2005 est imposée en chaque point de prélèvement,

Impacts

Les illustrations suivantes montrent les variations entre la situation de référence et la situation correspondant à une élévation de un mètre du niveau marin sur l'interface eau douce / eau salée.

Le schéma ci-dessous permet de localiser approximativement les sections réalisées.

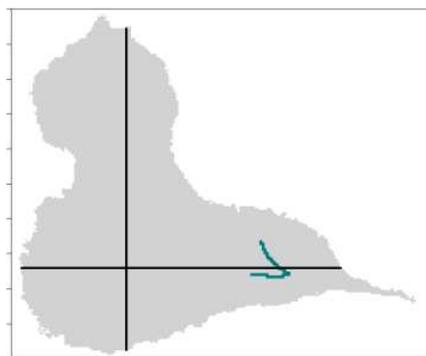
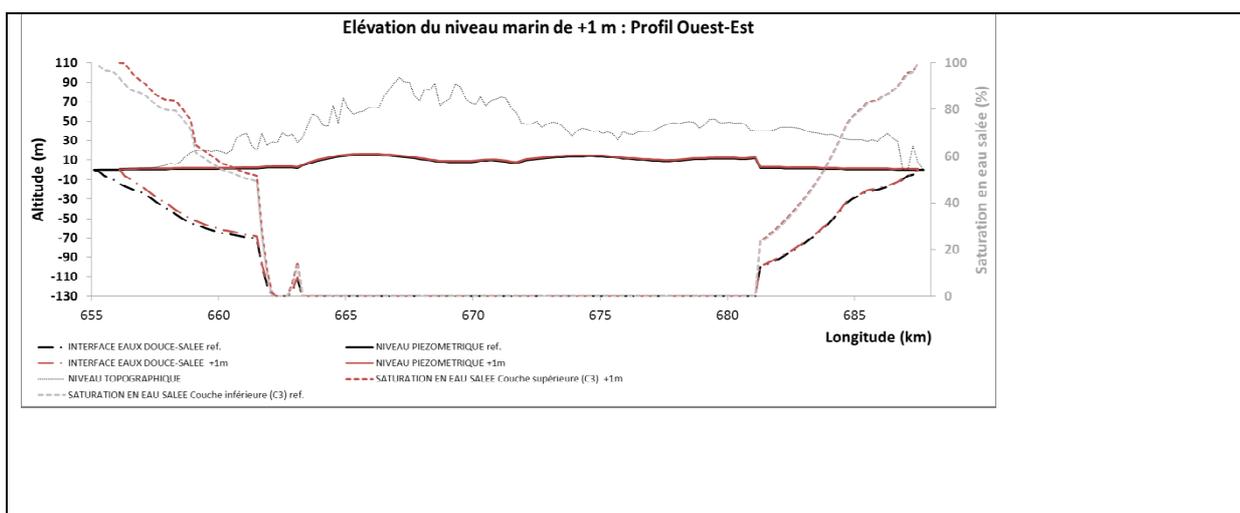
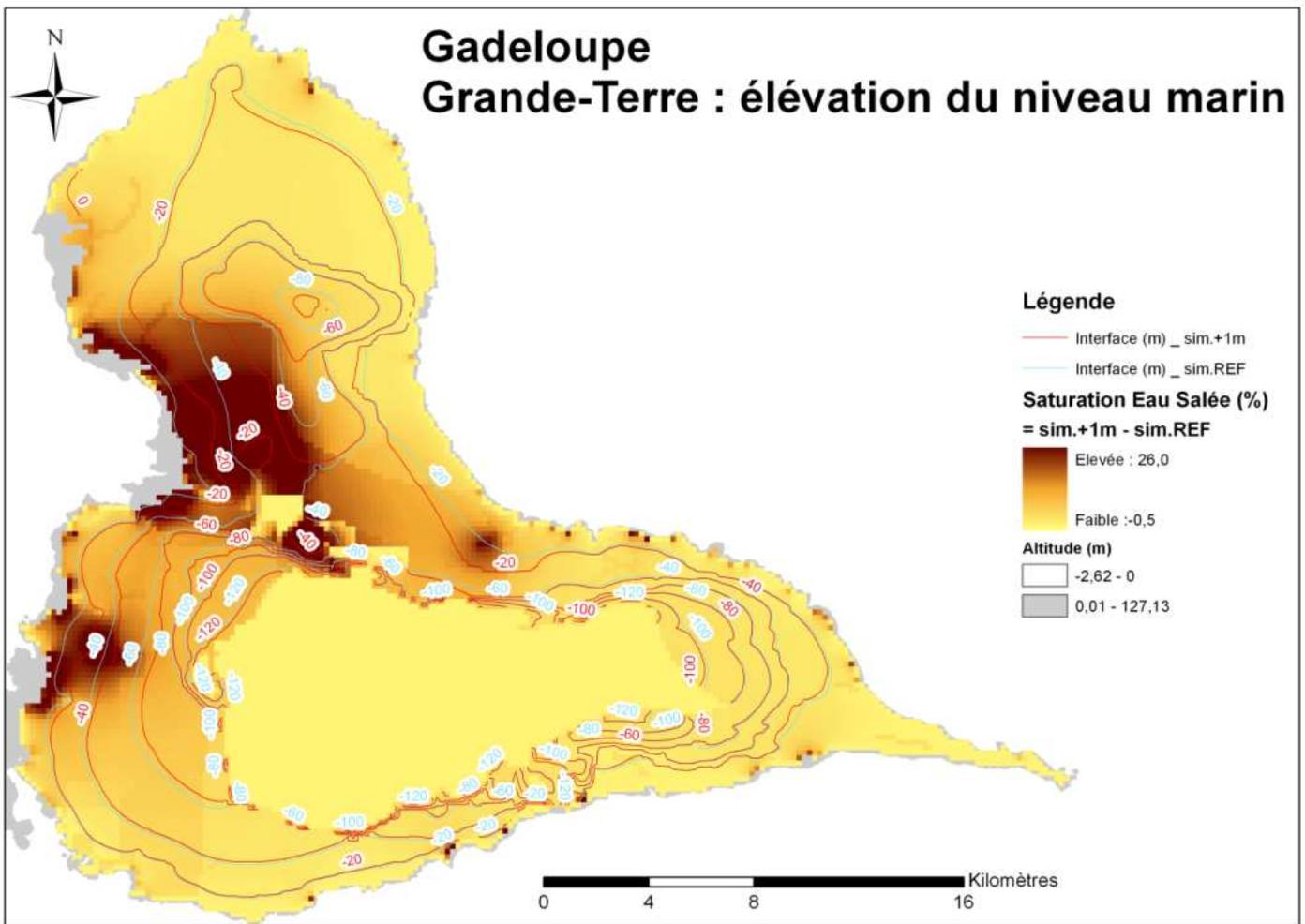


Illustration 14 : Localisation des sections de l'ouvrage ! Source du renvoi introuvable.



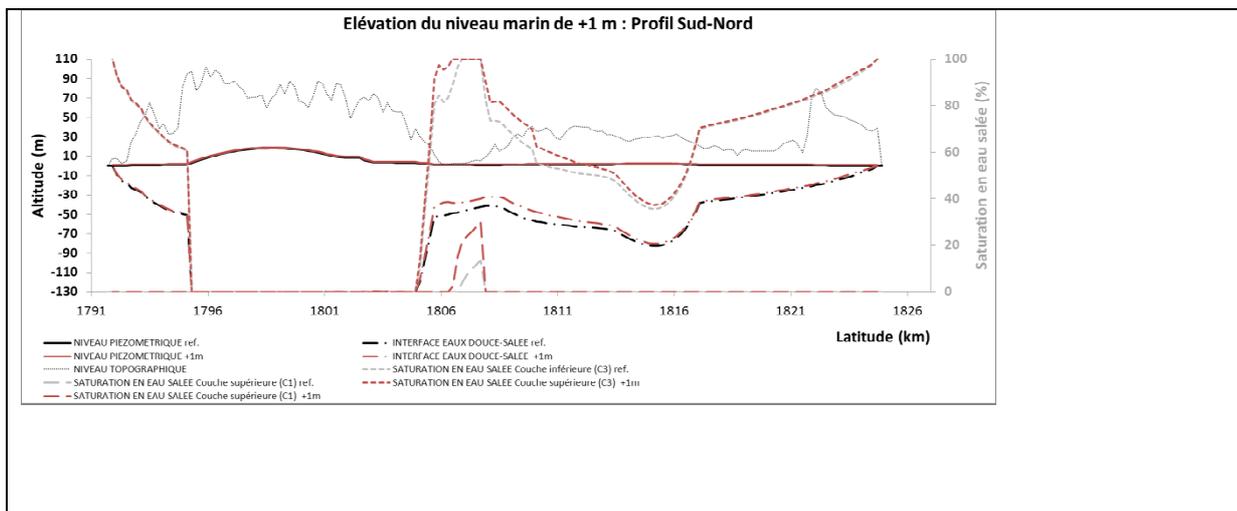


Illustration 15 : Impacts de la remontée du niveau marin (+1.00 m) sur la salinité

2.1.4. BIBLIOGRAPHIE

F. Ferrari, 1955. Les eaux souterraines de l'île de Grande-Terre en Guadeloupe.

CPGF, 1969. Grande-Terre. Etude géophysique par méthodes électriques et sismique. 1^{ère} et 2^{ème} phase.

S. Cottez, 1969. Etude des ressources en eau de la Grande-Terre. Première phase : étude des Plateaux du Nord. Rapport BRGM-69RME35ANT.

S. Cottez, 1970. Etude des ressources en eau de la Grande-Terre. Seconde phase : étude de la Plaine des Grippons. Rapport BRGM-70ANT14.

S. Cottez. Etude des ressources en eau de la Grande-Terre. Troisième phase : étude des Plateaux de l'Est. 1971. Rapport BRGM-71ANT30.

CPGF, 1972. Grande-Terre. Etude géophysique Grands-Fonds - Abymes.

S. Cottez, 1972. Etude des ressources en eau de la Grande-Terre. Quatrième phase : étude des Grands Fonds. Rapport BRGM-72ANT21.

S. Cottez, 1972. Etude des ressources en eau de la Grande-Terre. Rapport de synthèse des résultats acquis entre 1969 et 1972 par le BRGM et atlas des eaux souterraines de Grande-Terre. Rapport BRGM-72ANT36.

Commission Cordet. Projet de reconnaissance géophysique sur Grande-Terre de Guadeloupe en vue de l'implantation d'un forage profond. Phase 1 : compilation et synthèse des données géologiques et géophysiques existantes sur les îles calcaires de l'archipel de la Guadeloupe. Rapport BRGM-83SGN343MAR.

F. Garrabé, 1983. Evolution sédimentaire et structurale de la Grande-Terre de Guadeloupe. Thèse, Université de Paris-Sud. Centre d'Orsay.

P. Carlier, C. Paulin, T. Pointet, 1987. Simulation des écoulements naturels de la nappe de Grande-Terre en régime permanent d'un état de hautes eaux (1971) et d'un état moyen (1986). Introduction à l'étude de la recharge artificielle. Rapport BRGM-RP/87GLP175.

B. Henou, M. Normand, 1987. Etude de la série piézométrique du piézomètre Bois-David par un modèle hydrologique global, région du Moule – Grande-Terre. Rapport BRGM-87GLP205.

P. Carlier, C. Paulin, T. Pointet, 1989. Recharge et bilan de la nappe de Grande-Terre (Antilles françaises). Utilisations combinées de modèles hydrologiques et d'un modèle maillé – Aide à la gestion. Symposium I.F.A.C.

P. Carlier, C. Paulin, V. Petit, T. Pointet, 1989. Alimentation artificielle de la nappe de Grande-Terre (Guadeloupe). Conditions hydrogéologiques, essais d'injection, modélisation et simulation. Rapport BRGM-89GLP104.

V. Petit, M. Dourgaparsad, 1993. Alimentation en eau des futures installations aéroportuaires. Phase 1 : caractérisation hydrogéologique du site et évaluation de la faisabilité du projet. Rapport BRGM-R369234S93.

V. Petit, M. Dourgaparsad, 1993. Gestion des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante – Suivi qualité (1991 – 1992). Rapport BRGM-R36652ANT4S93.

M. Ficquet, M. Dourgaparsad, 1995. Suivi piézométrique de la nappe de Grande-Terre (Guadeloupe). Synthèse des données acquises entre janvier 1985 et décembre 1995. Rapport BRGM-R38769ANT95.

D. Thiery, 1995. Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le logiciel MARTHE. Version 5.4, Rapport BRGM n° R38108 HYT/DR 94.

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

D. Thiéry, 2005. Saltwater intrusion modelling with an efficient multiphase approach: Theory and several field applications. In: Groundwater and saline intrusion. Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting 18 SWIM Carthage 2004. Eds. L. Araguas, E. Custodio and M. Manzano, ISBN 84-7840-588-7, pp. 97-110.

S. Bézèlgues, N. Amraoui, avec la collaboration de Y.M. Le Nindre, 2006. Collecte et préparation des données en vue de la modélisation hydrodynamique des écoulements souterrains de Grande-Terre. Rapport intermédiaire BRGM/RP-54709-FR, 117p, 42 fig., 9 tab., 6 ann.

2.2. BASSE TERRE

2.2.1. PRESENTATION GENERALE

Basse-Terre est une des îles les plus récentes et l'une des plus hautes de l'arc des Petites Antilles. Six ensembles volcano-structuraux la composent ; ce sont du plus ancien au plus récent (Illustration 16) :

- Le complexe de base, constitué de coulées massives altérées et de hyaloclastites (brèches volcaniques sous-marines), qui affleure dans le Nord de l'île. Il serait antérieur à 3,5 Ma ;
- Le Massif septentrional suit la mise en place du complexe de base avec l'empilement d'épaisses coulées d'andésite, des épisodes explosifs violents (nuées ardentes, retombées de cendres et de ponces...). Les dômes dacitiques des Mamelles correspondent au dernier épisode volcanique vers - 1 Ma ;
- L'ensemble Pitons de Bouillante, Sans Toucher, Montagne de la Capesterre (appelé aussi Chaîne axiale) prolonge vers le Sud le Massif septentrional et forme l'armature de l'île. Dans cet ensemble deux épisodes de coulées andésitiques massives encadrent deux épisodes de lapilli, ponces et de brèches entre -1,5 à - 0,6 Ma ;
- Les Monts Caraïbes, à la pointe méridionale de la Basse-Terre débutent leur activité en milieu sous-marin avant de passer à une phase aérienne. Ils sont essentiellement constitués de ponces, couches et brèches, surmontées de coulées massives andésitiques et de dômes qui clôturent l'activité autour de - 0,5 Ma ;
- La Chaîne de Bouillante, située sur le flanc de la Chaîne Axiale, est un ensemble de petits appareils volcaniques dont la mise en place eut lieu entre - 0,8 à - 0,6 Ma. Elle correspond à des émissions pyroclastiques : scories, ponces et lahars entourant un épisode de laves massives.
- Le Massif de la Soufrière s'est individualisé aux alentours de - 0.1 Ma entre les Monts Caraïbes et la Petite Montagne au Sud et le Sans-Toucher au Nord. Le volcanisme se concentre le long d'un axe fissural majeur de direction Nord-Est - Sud-Ouest. Le Massif de la Soufrière n'est pas un stratovolcan, mais une juxtaposition d'appareils de nature et de morphologie variées.

Le fonctionnement hydrogéologique de l'île de la Basse-Terre est mal connu, notamment parce que l'organisation des unités volcaniques constitutives de l'île est complexe, et que les

données géologiques disponibles ne permettent pas une bonne compréhension de ces structures. Leur exploitation se fait uniquement par captage de sources pour l'eau potable. Ils constituent néanmoins une ressource en eau souterraine non négligeable, en alternative aux eaux superficielles, notamment en période de carême et plus particulièrement dans les zones les plus arides de l'ouest de l'île (Côte-Sous-le Vent).

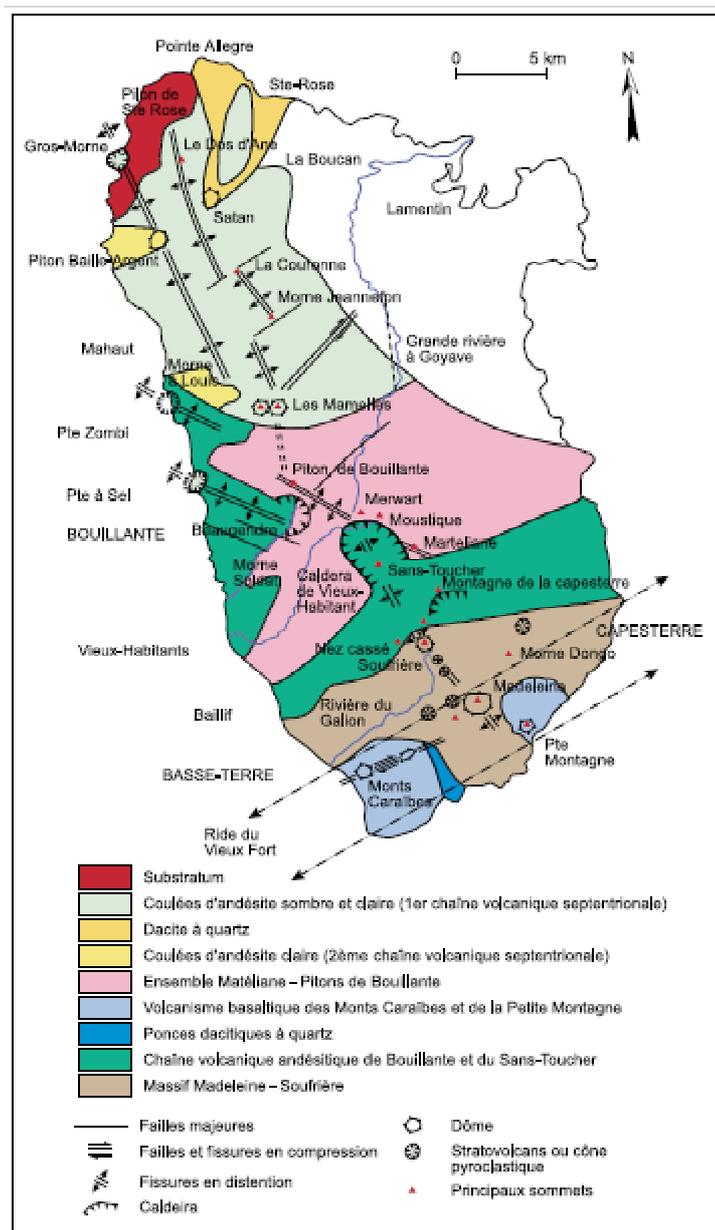


Illustration 16 : Ensembles volcano-structuraux de la Basse-Terre (d'après D. Westercamp).

On distingue deux grands types de roches volcaniques : les laves massives et les coulées pyroclastiques. qui, par leur structure et leur texture, possèdent des propriétés variées pour ce qui concerne l'infiltration et le stockage de l'eau. Globalement :

- les laves sont imperméables de par leur texture mais peuvent présenter une perméabilité de fractures dues au refroidissement et au jeu de la tectonique;
- les pyroclastiques présentent, en revanche, du fait de leur composition de blocs et matrice silto-sableuse, une forte perméabilité d'interstice et une assez grande transmissivité. Elles ont tendance à s'altérer rapidement et donc à se colmater ; leur manque de compétence limite le phénomène de fracturation (peu tectonique), susceptible de réactiver la circulation.

Le comportement hydrogéologique des formations rencontrées peut être schématisé de la manière suivante :

- Les andésites massives qui ne présentent pas à l'origine de perméabilité de fissures. La fissuration existante est dite :
 - primaire, acquise par la lave lors de son refroidissement et/ou son écoulement sur un substratum froid.
 - secondaire, lorsqu'elle se développe localement au sein de la roche quand celle-ci est soumise à des contraintes tectoniques. Ce sont les fractures globalement Est-Ouest qui, en ouverture et en jouant le plus souvent, présentent les propriétés les plus intéressantes pour la prospection hydrogéologique. Ces caractéristiques seront recherchées lors d'études ponctuelles.
- Les scories et les ponces qui, bien qu'ayant une forte porosité, ne permettent pas généralement un transfert rapide de l'eau. Cependant, des niveaux plus grossiers peuvent être présents et jouer le rôle de drain, et renfermer une nappe d'eau.
- Les dépôts pliniens constitués d'éléments ponceux et d'éléments massifs arrachés aux parois de la cheminée volcanique présentant une granulométrie variée, des cendres aux lapilli, avec parfois des bombes. La porosité de ces dépôts est due aux interstices. Les dépôts forment des aquifères d'épaisseur réduite. On trouve cette formation entre la Soufrière et Baillif.
- Les alternances de lapilli, ponces et de coulées andésitiques massives qui forment la partie nord du massif de la Soufrière sont susceptibles de constituer des aquifères de faible ou moyenne extension.
- Les alluvions des basses vallées peuvent être aquifères et constituer des ressources d'appoint comme la vallée de Lostau ou de Baillif. Les alluvions sont très développées le long de la Grande Rivière à Goyave et de ses principaux affluents. Ils jouent le rôle de drains hydrauliques au sein des formations volcano-sédimentaires.

- Les vallées de la Côte-sous-le-vent renferment des aquifères mixtes, composés à la fois des alluvions de rivières et du substratum qui peut également participer à l'alimentation.
- Les formations volcano-sédimentaires de la plaine du Nord-Est de la Basse-Terre constituées de produits d'érosion de la chaîne volcanique. Au droit de ces formations, les bilans hydrologiques font apparaître une infiltration notable.

2.2.2. ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DE BASSE TERRE

Cette première évaluation a reposé sur les outils suivants : (1) analyse des données hydrométriques et pluviométriques grâce à un logiciel de modélisation développé par le BRGM, afin d'identifier les bassins versants dans lesquels les circulations d'eaux souterraines sont significatives ; (2) identification de secteurs où l'infiltration des eaux de surface vers le milieu souterrain est majoritaire, grâce à la méthode de l'IDPR (indice de développement et de persistance des réseaux) et (3) estimation et spatialisation de la pluie efficace par une approche simplifiée.

2.2.2.1. ANALYSE DES DONNEES HYDROMETRIQUES

L'analyse a été réalisée sur 27 bassins versants suivants de la Basse Terre à l'aide du logiciel TEMPO du BRGM.

Sur 6 bassins versants, la modélisation doit être prise avec des réserves en raison du critère de Nash faible ($Nash < 0.5$) : rivières du Plessis, Lostau, Nogent, Beaugendre, Herbes et Moustique Sainte-Rose. Les 21 bassins versants restant ont été répartis en deux types, selon la contribution moyenne de l'écoulement lent ($<$ ou $>$ à 50 %). Les résultats sont présentés sous forme cartographique dans l'illustration 17.

- Type RR : L'écoulement rapide est majoritaire pour 8 de ces bassins versants et les aquifères ne semblent pas jouer un rôle significatif dans leur fonctionnement hydrologique (% d'écoulement lent $<$ 50 %). Pour cette classe de bassins versants, le temps de transit moyen de la composante écoulement lent est d'environ 30 jours.
- Type AA : Pour 13 de ces bassins versants, les aquifères sont susceptibles de jouer un rôle significatif dans leur fonctionnement hydrologique (contribution moyenne de l'écoulement lent supérieur à 50 %). Pour cette classe de bassins versants, le temps de transit moyen de la composante écoulement lent est d'environ 50 jours.

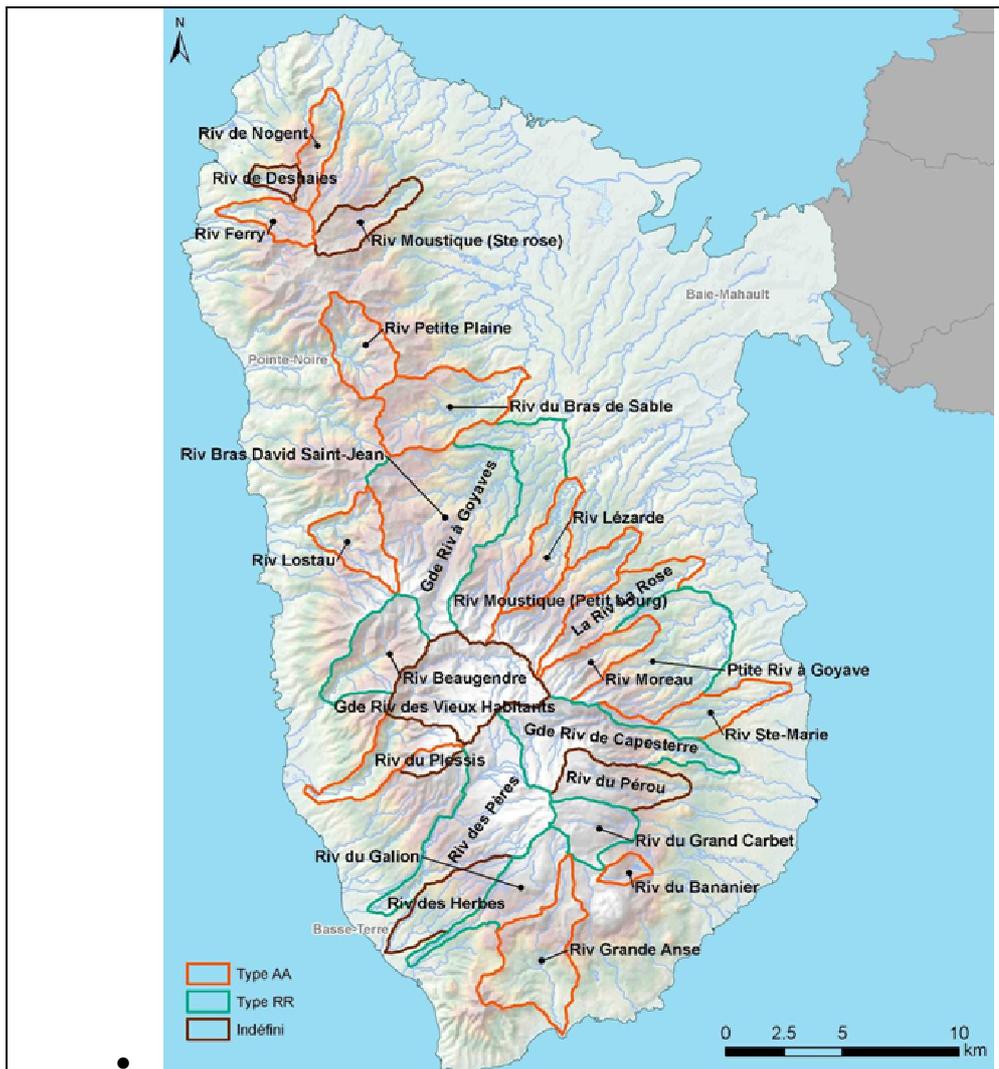


Illustration 17 : Répartition des bassins selon leur type AA (Aquifère Alimentant majoritairement la rivière) ou RR (Rivière alimentée majoritairement par l'écoulement Rapide)

2.2.2.2. L'INDICE DE DEVELOPPEMENT ET DE PERSISTANCE DES RESEAUX (IDPR)

L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Il se calcule en comparant le réseau hydrographique naturel au réseau de talwegs calculés.

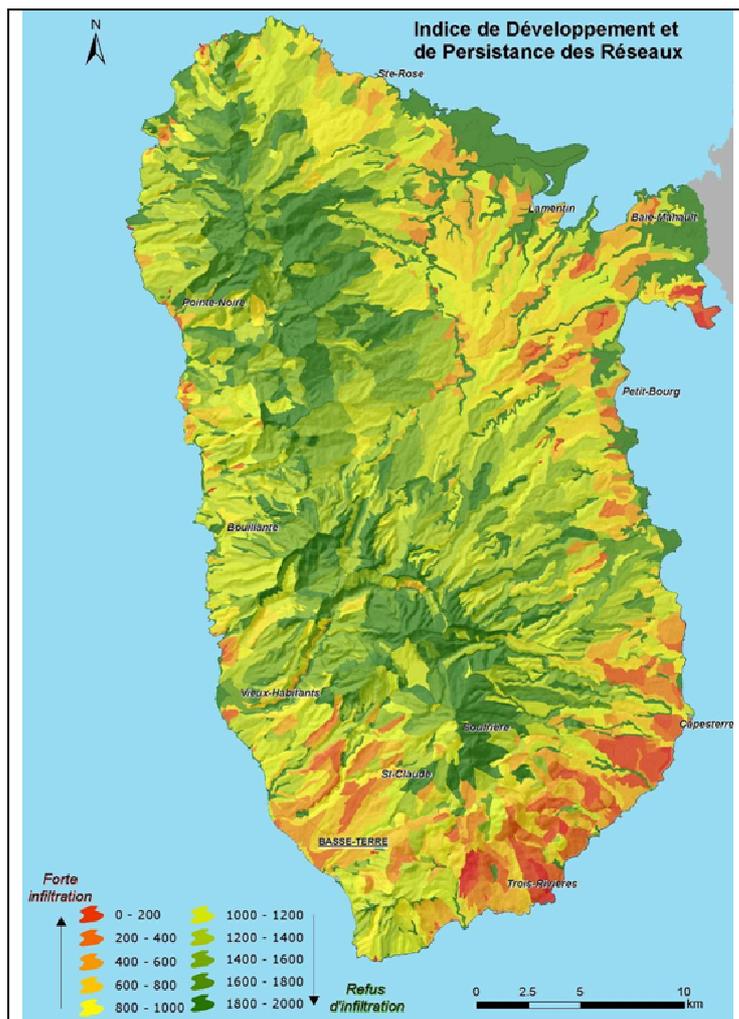


Illustration 18 : Valeur de l'IDPR par unités fonctionnelles

A l'aide de l'IDPR (Illustration 18) il est possible de préciser la classification des bassins (Illustration 17) et obtenir ainsi une classification un peu plus détaillée : l'illustration 19

2.2.2.3. ESTIMATION DE LA PLUIE EFFICACE

L'estimation de la pluie efficace est réalisée au pas de temps journalier à partir du bilan hydrologique au moyen du modèle de Thornthwaite).

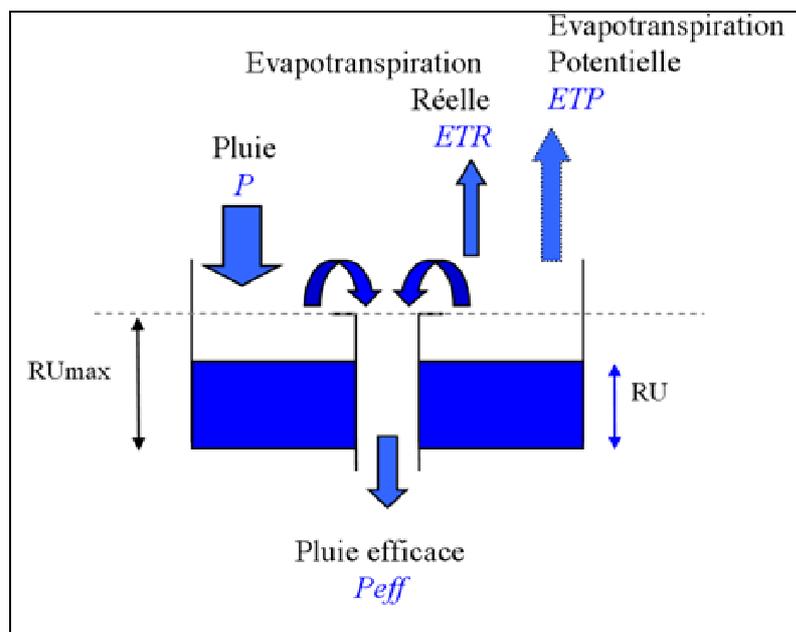


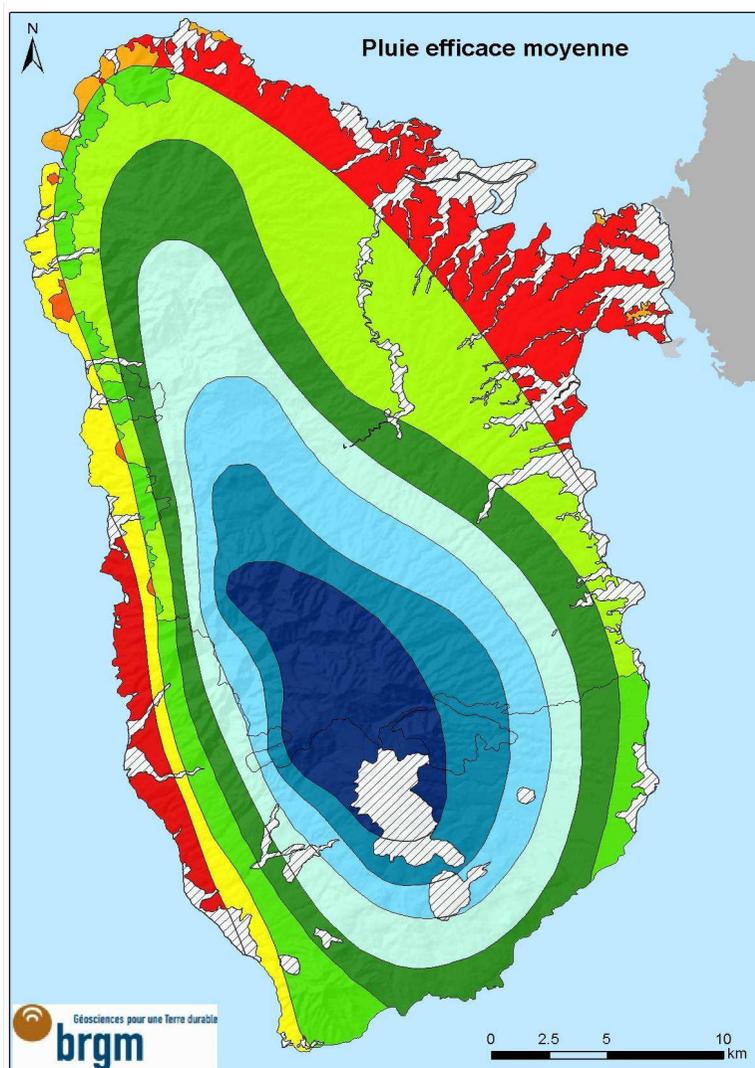
Illustration 20 : Modèle de Thornthwaite (1948)

Le principe de ce modèle repose sur l'hypothèse que l'ETR est toujours inférieure ou égale à l'ETP. Ainsi, à chaque pas de temps de calcul, on vérifie si l'ETP peut être satisfaite ou non, en « puisant » sur les Précipitations (P) ou, si celles-ci sont insuffisantes, sur la Réserve Utile (RU) du sol. Si $P > ETP$, alors $ETR = ETP$. Sinon ($P < ETP$), l'ETR dépend de la quantité d'eau disponible au sein de la RU ; si elle est suffisante, $ETR = ETP$ sinon $ETR < ETP = RU$. A chaque pas de temps n, la pluie efficace est alors au maximum égale à $P - ETR$.

Afin de réaliser ces calculs d'ETR et de pluie efficace pour Basse Terre, il a été nécessaire de procéder à une spatialisation des données, notamment les données de pluviométrie d'ETP et de RUmax.

L'Evapotranspiration Potentielle a été acquise au pas de temps journalier auprès de Météo-France qui le calcule en un seul point de l'île (station du Raizet – altitude : 8m) selon la formule de Penman-Monteith. Une relation linéaire de décroissance de l'ETP a ensuite été établie en fonction de l'augmentation d'altitude. Le gradient altimétrique (valeurs en mm) est :

$$ETP = -0.7056 \text{ Altitude} + 1522.$$



Contribution à l'évaluation de la ressource en eau souterraine de la Basse-Terre (Guadeloupe)

Avertissement : La lecture de cette carte ne doit pas être dissociée des interprétations présentes dans le rapport correspondant

Pluie efficace moyenne interannuelle (en mm/an)



Chaque zone possède :

- une chronique de pluie (mesurée sur la station météo choisie, cf. carte des isohyètes),
- une chronique d'ETP (déduite de l'ETP du Raizet corrigée par l'altitude moyenne de la zone)
- et une valeur de R_{Umax} (déduite de la carte pédologique de l'INRA).

Compte tenues des données existantes (incertitude sur les isohyètes, une seule chronique d'ETP, 2 valeurs de R_{Umax} , pas de corrections à l'aide des coefficients culturaux), cette carte de pluie efficace est approximative. Elle donne une répartition simplifiée de la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

Méthode simplifiée de la pluie efficace

L'estimation de la pluie efficace est réalisée au pas de temps journalier à partir du bilan hydrologique au moyen du modèle de Thornthwaite (Figure ci-dessous).

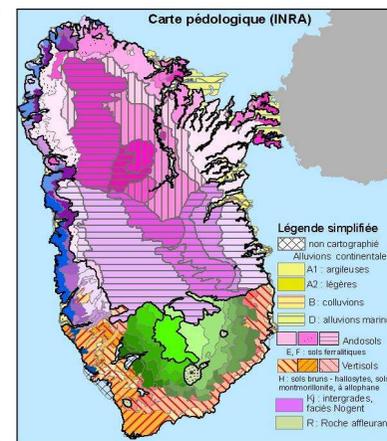
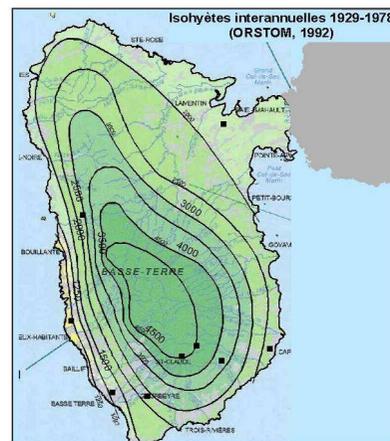
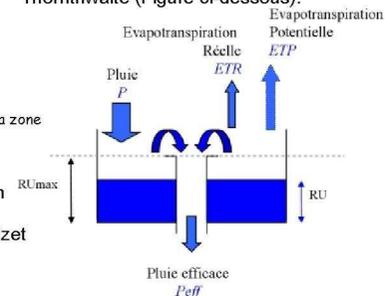


Illustration 21 : Paramètres nécessaires au calcul de la pluie efficace

2.2.2.4. ESTIMATION DE LA PART D'EAU INFILTREE

2.2.2.4.1. Approche globale

La pluie efficace se divise entre infiltration et ruissellement. L'estimation du pourcentage d'eau participant au ruissellement permettra d'en déduire la part d'eau participant à la recharge.

La part d'eau moyenne participant au ruissellement est estimée à 65 % (en moyenne sur l'ensemble de la Basse-Terre, estimation ORSTOM cohérente avec l'analyse des débits classés, les résultats de Tempo et de l'IDPR).

Les calculs simplifiés présentés dans le tableau ci-après (cf. Illustration 22) permettent d'obtenir un ordre de grandeur de la part d'eau participant à la recharge des aquifères. **Ainsi, la part d'eau participant à la recharge est estimée à 945 mm, soit environ 800 millions de m³ par an.**

	en mm / par an	en Mm3 / an	Commentaire
Pluviométrie Moyenne	3500	2 975	D'après Météo France
Pluviométrie efficace moyenne	2700	2 295	D'après calcul cf. chapitre précédent
Evapotranspiration réelle	800	680	Calcul Pm - Peffm
Part d'eau participant à la recharge	945	803	Calcul = 35% de Peffm
Part d'eau participant au ruissellement	1755	1 492	Calcul = 65% de Peffm

Illustration 22 : approche globale simplifiée : calcul de l'ordre de grandeur de la part d'eau participant à la recharge

2.2.2.4.2. Approche par bassin versant

Afin de mieux contraindre et de spatialiser l'estimation de la part d'eau infiltrée, la carte de la pluie efficace réalisée dans le chapitre précédent a été croisée avec la carte de l'IDPR en affectant aux valeurs IDPR un coefficient d'infiltration. Pour chaque bassin versant une valeur d'IDPR médian a été ainsi calculée.

N° de Classe	Valeur de l'IDPR	Signification	Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation de la recharge	Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation du ruissellement
1	0 – 500	Infiltration très majoritaire	80%	20%
2	500 – 1000	Infiltration majoritaire	65%	35%
3	1000 – 1500	Ruissellement important	50%	50%
4	1500 – 2000	Ruissellement majoritaire	35%	65%

Illustration 23 : valeurs d'IDPR et coefficients d'infiltration associés

Le résultat de ce calcul est présenté dans l'Illustration 23. L'échelle de calcul et de représentation correspond aux sous-bassins versants, et permet de bien prendre en compte le gradient pluviométrique. Le volume d'eau infiltré calculé par cette méthode est du même ordre de grandeur que celui calculé dans le chapitre précédent. La carte d'estimation de la recharge constitue ainsi un des indicateurs des potentialités en termes de ressources en eau souterraine.

Le volume réellement exploitable ne représentera quant à lui qu'une partie seulement de ce volume estimé qui ne tient pas compte des contraintes d'accès liées par exemple à la topographie ou à l'occupation du sol, ni des contraintes d'exploitabilité telle que la productivité unitaire des forages selon les formations, leur rayon d'influence et les impacts sur les écoulements de surface et les milieux.

Il apparaît que les bassins versants à meilleures potentialités sont situés en altitude (plus forte pluviométrie et végétation hygrophile favorisant l'infiltration), et dans la partie sud de l'île (formations géologiques plus récentes et plus perméables).

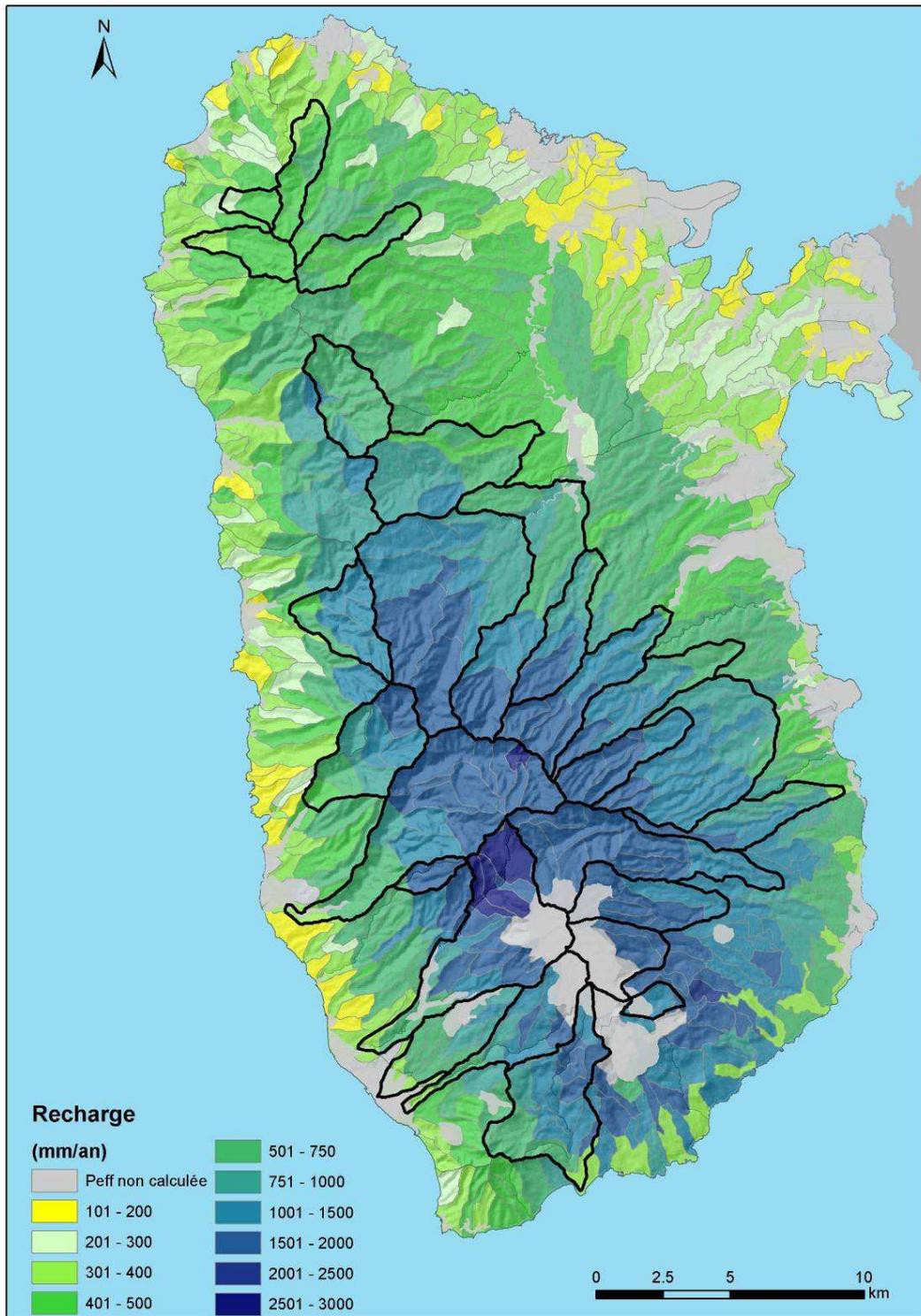


Illustration 24 : Estimation de la recharge vers les eaux souterraines, par sous-bassins versants, en mm

2.2.2.4.3. Identification des zones à meilleures potentialités hydrogéologiques

Croisement synthèse des BV et alimentation

Le classement des bassins versants présenté dans l'illustration 19, confronté aux conclusions de prospections de terrain et aux estimations de volumes infiltrés permettent de cibler les bassins versants pour lesquels la probabilité de trouver une ressource en eau souterraine significative.

Ainsi, les bassins versants de type RR-SI paraissent très intéressants, notamment en raison du faible impact supposé de l'exploitation des eaux souterraines sur le débit des cours d'eau (ce qui évite ainsi les éventuels conflits d'usage).

Dans le Sud-Ouest de Basse-Terre, les bassins versants de la rivière des Pères, des Herbes et du Galion sont tous trois de type RR-SI et présenteraient une recharge de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de m³ par an. Le bassin versant de la rivière Grande Anse, de type AA-SI est également très intéressant, mais comparativement avec un impact éventuellement plus marqué, dans le cas d'une exploitation intensive, sur le débit du cours d'eau.

Dans l'Est de la Basse-Terre, les bassins versants de la Grande Rivière à Goyaves (incluant également celui de la rivière Bras David Saint Jean) et de la Petite Rivière à Goyaves sont les plus prometteurs. Ils sont de type RR-SI et présenteraient une recharge de l'ordre d'une trentaine de millions de m³ pour la petite rivière à Goyaves et de plus de cinquante millions de m³ pour la Grande Rivière à Goyaves.

Les bassins versants de type AA-SI quant à eux sont également de bonnes cibles potentielles en raison de la présence avérée d'aquifère alimentant les rivières. Une bonne caractérisation de l'impact des forages sur le débit des rivières sera à réaliser notamment grâce à des pompages d'essais de longue durée.

Enfin, les bassins versants de type AA-SR pourront ponctuellement être étudiés si certaines spécificités nécessitent la mobilisation d'une ressource en eau localisée dans ce type de bassin versant. Ces bassins versants, majoritairement situés dans le Nord de la Basse-Terre, présente en outre des volumes d'eau infiltrés, proportionnellement aux autres, relativement faible (au maximum de quelques millions de m³ par an).

2.3. MARIE GALANTE

Comme la Grande-Terre, l'île de Marie-Galante est composée essentiellement de formations sédimentaires carbonatées plio-pléistocènes, recouvrant des formations volcano-sédimentaires peu affleurantes (anse Piton). La coupe synthétique, établie à partir des forages réalisés au début des années 1980, montre une série carbonatée de 230 m environ avec des intercalations de niveaux à éléments volcaniques.

Les traits structuraux majeurs : Escarpement de Bielle-Robert, les limites orientales du Marais de Saint-Louis, la Barre de l'île donnent une structure compartimentée de l'île qui rappelle celle de la Grande-Terre. S'y ajoutent les terrasses d'abrasion émergées de la côte orientale de l'île. L'accident de la Barre de l'île, de dimension régionale et qui se poursuit en Basse-Terre, délimite le compartiment abaissé des Bas au Nord de celui des Hauts au Sud.

Le compartiment des Bas peut être interprété comme la partie effondrée d'une faille normale. Les formations géologiques affleurantes appartiennent au sommet de la coupe synthétique (calcaires à algues et polypiers en alternance avec des niveaux sans polypiers). Le relief est peu accentué et les ravines possèdent de larges fonds plats. Le pendage général est vers l'Ouest.

Le compartiment des Hauts présente, par le jeu d'escarpements nés de failles, un grand nombre de plateaux d'altitude différente : Borée (190 -200 m), Étang Noir (140 - 160 m), Bielle (120 - 130 m), Robert (150 m), Pirogue (110 -130 m) et à l'Ouest une région dite des « mornes occidentaux ». À l'origine, ce vaste plateau calcaire des Hauts était quasiment horizontal. Fracturé, il a été basculé globalement vers l'Ouest de telle sorte que les formations à l'Est sont plus basses dans la série carbonatée mais plus hautes altimétriquement. Il se termine à l'Ouest par les mornes occidentaux qui rompent brutalement avec l'homogénéité des grands compartiments abaissés en gradins vers l'Ouest et la région des sources. Les limites structurales de ces petits compartiments sont formées par des failles normales d'orientation N 170 à N 180° E et N 70 à N 90° E. Enfin le Marais de Saint-Louis, zone marécageuse développée au pied des mornes occidentaux et au débouché de la rivière Saint-Louis, résulte de la poursuite vers l'Ouest de l'effondrement par paliers.

La côte méridionale (Les Basses) et la côte orientale (Les Galets) sont constituées par des falaises et terrasses étagées interprétées comme d'anciennes terrasses infra-littorales émergées, à 5 et 50 m

d'altitude. Une troisième terrasse a été mise en évidence à la cote 120 m environ.

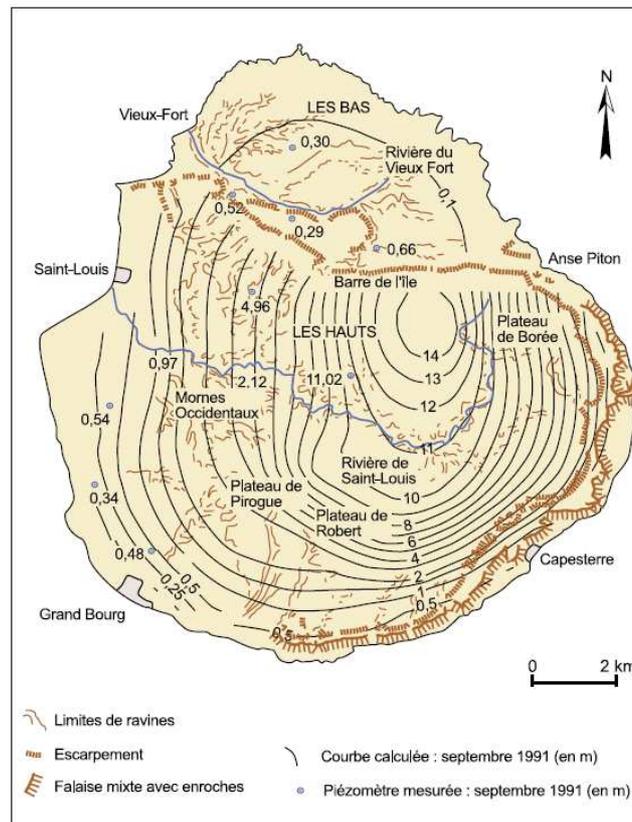


Illustration 25 : Schéma hydrogéologique de Marie Galante

Le schéma hydrogéologique de l'île de Marie-Galante (Illustration 25) est le suivant :

- au Nord, la région des Bas constituée par les calcaires supérieurs contenant une nappe en équilibre hydrostatique avec la mer. La perméabilité est en général forte (supérieure à 3.10-4 m/s) et le coefficient d'emménagement élevé. La présence d'eau salée à faible profondeur (-20 à -30 m maximum) interdit le prélèvement à partir d'un seul puits exploité à fort débit. Il convient comme dans le Nord de la Grande-Terre de multiplier les ouvrages à petit débit.
- au Sud de la faille de la Barre de l'île, on distingue plusieurs sous-ensembles :
 - ✓ le marais de Saint-Louis : la nappe contenue dans les plateaux des Hauts s'écoule en direction de la mer ; le biseau salé est présent malgré un hydrodynamisme fort. En limite des reliefs (les Mornes occidentaux), les forages des sources et les piézomètres

de Fond Jeanne, Sibley... ont des valeurs de transmissivité élevées. C'est une région privilégiée pour l'exploitation de la nappe, les reliefs sont faibles et les accès aisés ;

- ✓ la région des Hauts peut se diviser en une partie orientale dans laquelle la nappe est peu productive et difficile d'accès (Plateau d'Etang Noir) et une partie occidentale qui se développe autour de la vallée de la rivière Saint-Louis plus productive et où, à la faveur des routes et pistes, on peut très fortement diminuer l'épaisseur de terrain non saturé ;
- ✓ le Plateau du Robert, au Sud de l'escarpement de Bielle-Robert, dans lequel est implanté le forage de Rabi. Le substratum peu profond et la faible tranche d'eau expliquent la mauvaise productivité de ce forage ;
- ✓ le Plateau de Pirogue dans lequel ont été forés les ouvrages de Bouquinquant, Bambara, La Treille... présente des caractéristiques hydrauliques intéressantes : transmissivité de l'ordre de 10^{-3} m²/s et un coefficient d'emmagasinement de l'ordre du 1 %.

Sur le pourtour sud de l'île, de Ballet (au Nord de Grand-Bourg) à l'Anse Piton en passant par Capesterre, la zone de contact entre l'eau de la nappe et l'eau salée limite les possibilités d'exploitation. Les conditions sont proches de celles régissant le compartiment des Bas. Le forage de Coulisse, trop fortement sollicité, produit aujourd'hui une eau fortement minéralisée.

L'alimentation de la nappe est uniquement assurée par les pluies; il n'y a pas de rivière pérenne, hormis en aval des sources, dans la basse vallée de la rivière de Saint-Louis.

La variation de l'infiltration efficace n'obéit pas uniquement à la répartition spatiale de la pluviosité à la surface de l'île. Elle fait intervenir la présence ou non de dépressions fermées dans lesquelles, après un stockage des eaux de pluie, l'infiltration est plus importante. C'est le cas dans la zone centrale (les Hauts) où les valeurs atteignent 180 mm/an. En revanche, en ce qui concerne les zones périphériques, le ruissellement lors des pluies est plus important et l'infiltration efficace diminue considérablement. L'épaisseur de terrain non saturé dans la région des Hauts est supérieure à 100 m en moyenne. Elle influence la recharge par la durée du transit, d'une part en raison de l'épaisseur mais d'autre part en raison de la perméabilité variable (fissuration, dissolution, interstices...). Le décalage observé entre la pluie et la recharge est d'environ un mois. **L'estimation annuelle moyenne de la recharge calculée grâce au modèle, en régime permanent calé sur les basses**

eaux, est de 7,5 Mm³.

Le biseau d'eau salée se manifeste en périphérie de l'île et pénètre de façon importante dans les régions du Marais de Saint-Louis et des Bas. La carte des débits d'échange avec la mer montre en année moyenne un écoulement privilégié entre Saint-Louis et Grand-Bourg de 30 m³/h par maille, alors que partout ailleurs, sauf entre Vieux-Fort et l'Anse Piton, il est de l'ordre de 10 m³/h.

L'exploitation actuelle de la nappe à partir des sept forages existants est de l'ordre de 0,5 Mm³/an, soit environ 7 % de la recharge annuelle (Balisier : 14 m³/h, Etang Noir 1,5 m³/h, Source 1 : 9 m³/h, Source 2 : 3 m³/h, Rabi : 12 m³/h, Mouessant : 22 m³/h et Boulogne : 15 m³/h), ce qui représente une ressource de 1 524 m³/j.

2.4. SAINT MARTIN

L'île de Saint-Martin, située au nord immédiat de Saint-Barthélemy, est un élément émergé du banc d'Anguilla. Le relief est modéré avec un point culminant : le Pic Paradis (424 m). Deux unités morphologiques majeures forment l'ossature de la partie française de l'île de Saint-Martin. La région orientale, montagneuse, est constituée de plusieurs arrêtes rocheuses séparées par des vallées. La zone occidentale qui correspond à la péninsule des Terres Basses n'est rattachée à la précédente que par deux cordons sableux qui cernent le Grand Etang de Simson baie.

Excepté les formations superficielles (éboulis et alluvions), qui nappent respectivement les pentes et s'accumulent dans les fonds de vallées, trois types de formations géologiques sont rencontrés à Saint-Martin :

- des formations sédimentaires franches ou volcano-sédimentaires, mises en place à différentes périodes de l'histoire de l'île et distribuées sur l'ensemble de son territoire ;
- des formations volcaniques effusives (laves) et explosives (cendres et brèches) essentiellement présentes dans la partie centrale ;
- des roches intrusives, d'âge tardif, qui recourent la plupart des séries volcaniques et sédimentaires. Elles occupent les secteurs Nord-Est de la partie française et forment des reliefs importants.

À Saint-Martin, des forages productifs dans les formations volcaniques ont été implantés sur la faille prenant en écharpe l'île d'Est en Ouest. L'implantation précise a été définie suite à la prospection par émanométrie du radon.

2.5. LA DESIRADE, SAINT-BARTHELEMY ET LES SAINTES

Elles ont un contexte géologique a priori défavorable pour la présence d'eau souterraine. Pour cette raison, il n'y a pas eu de recherche systématique comme dans le reste du département aussi n'y a-t-il pas d'exemple de forage productif.

2.6. CONCLUSION

En matière de ressources en eau souterraine, l'archipel de la Guadeloupe présente des situations très contrastées qui résultent de la diversité géologique de son sous-sol.

La Désirade, Saint Barthélemy et les Saintes ne disposent pas de réelles ressources en eau souterraine : sur ces îles, les populations se sont adaptées à cette situation en créant de réservoirs de stockage individuels d'eau de pluie. Plus récemment le problème d'alimentation en eau a été traité à une échelle plus globale au moyen d'apports extérieurs. L'île de Saint Martin possède un peu plus de marge, mais la situation reste localement fragile notamment face à la pression sur la ressource en eau induite par le développement de zones touristiques.

Marie Galante dispose d'une recharge de ses nappes évaluée à 7,5 millions de m³/an pour des prélèvements de 0,55 millions de m³, soit une pression sur la recharge annuelle de 7%. ce qui permet d'absorber en évolution climatique. En revanche, une vulnérabilité de la nappe à une remontée du niveau marin est à noter, notamment dans le secteur du marais de Saint-Louis.

L'île principale de l'Archipel dispose de ressources importantes, la Grande Terre et Basse Terre bénéficiant chacune d'une recharge de 8.108 m³/an. Le prélèvement annuel ne dépasse guère 5% du volume de cette recharge : le niveau de la réserve en eau souterraine ne devrait donc pas baisser de façon extrême, même si l'on cerne mal, a priori, l'influence du changement climatique sur les cyclones et sur la pluviométrie.

D'après les estimations réalisées sur d'autres îles telles que la Réunion, on peut estimer qu'une augmentation de température moyenne de l'ordre de 2°C aurait pour conséquence d'augmenter l'ETP de l'ordre de 10% (variable suivant l'altimétrie), Grande Terre et la côte sous le vent étant alors les plus touchées.

Dans un contexte de changement climatique, il apparaît donc que la ressource globale en eau serait encore largement suffisante tandis que les trois problèmes actuels les plus aigus de l'île concernant la ressource en eau subirait une légère aggravation. Il s'agit :

- De la mauvaise adéquation besoin/ressource, obligeant ainsi à envisager des transferts d'eau plus importants que ceux actuellement à l'étude, notamment le transfert de Basse

Terre vers Pointe à Pitre voire Grande Terre,

- De la remontée du niveau marin qui va réduire la superficie notamment au droit de la plaine des Grippons (Grande terre) et,
- D'accentuer la progression du biseau salé si l'on y associe des prélèvements mal maîtrisés en zone littorale.

3. LA GUYANE

La Guyane française se situe au Nord-Est du Continent sud-américain, à la marge nord-est du bouclier des Guyanes, craton qui occupe la rive gauche de l'Amazone, depuis le Sud-Est de la Colombie à l'estuaire de l'Amazone.

Le département de la Guyane constitue un district hydrographique à part entière. Cette région monodépartementale, qui s'étend sur une superficie d'environ 84 000 km², est composée de vingt-deux communes dont les limites administratives sont très proches des délimitations des bassins versants. Ce district présente la particularité de ne pas être un bassin versant hydrographique car ses limites Est et Ouest, sont respectivement les fleuves Oyapock et Maroni, qui assurent également le rôle de frontière avec le Brésil et le Surinam. Les eaux s'écoulant dans ces grands fleuves sont donc, pour partie, issues du ruissellement sur des bassins versants situés hors des limites de l'Union Européenne.

D'après l'INSEE, la population était de 202 000 habitants au 1er janvier 2006. La répartition de la population sur le département présente une forte disparité géographique : 80% de la population est concentrée en zone littorale, sur moins d'un cinquième du territoire.

Le climat de la Guyane est de type intertropical humide. Le régime des précipitations comporte une alternance saison humide/ saison sèche. La saison des pluies s'étend du 15 novembre à mi- août (9 mois), avec deux mois plus pluvieux (mai et juin), qui voient tomber 45 % des précipitations annuelles. Au total, ces précipitations annuelles sont rarement inférieures à 2 m, elles atteignent 4 m à la montagne de Kaw. L'humidité atmosphérique est proche de la saturation (90 % en mai, 81 % en saison sèche) et réduit d'autant l'évapotranspiration.

D'après l'Unesco, la Guyane est au second rang mondial en termes d'eau douce disponible avec un volume de 800 000 m³/hab/an. A titre de comparaison, la moyenne mondiale de cette disponibilité en eau est de 1 800 m³/hab/an. Sur la base d'une consommation journalière de 220 l/hab. urbain et 50 l/j/hab. rural en 2006, les besoins en eau potable pour la population théoriquement connectée sont estimés à 15 millions de m³/an.

L'eau potable provient à 98% des eaux de surface. Cependant en Guyane, 15% de la population

n'est pas connectée à un système d'adduction d'eau potable (estimation 2006).

En volume, les fleuves représentent environ 90% de l'eau prélevée, les forages et les puits 2% et la récupération de l'eau de pluie par retenue collinaire ou autres, 8%.

Les principaux fleuves de la Guyane sont le Maroni, l'Oyapock, la Mana, l'Approuague le Sinnamary et la Comté. Les hautes eaux ont lieu en mai et un étiage marqué a lieu en octobre. Cette tendance annuelle est toutefois marquée par une légère baisse des débits durant la période dite du petit été de mars.

Jusque vers 1980, l'hydrogéologie de la Guyane a été pratiquement ignorée, les ressources en eau de surface subvenant largement aux besoins des villes et villages et, a fortiori, de l'habitat dispersé. Les eaux souterraines sont présentes en quantités significatives dans de nombreux milieux naturels.

Tous contextes confondus - socle ou terrains sédimentaires - les eaux souterraines sont présentes et économiquement exploitables sur une profondeur qui n'excède guère 100 m. C'est donc une manifestation de sub-surface assez faible, à l'échelle d'une zone d'exploitation telle qu'un village ou à l'échelle d'une formation géologique qui n'excède pas 100 m verticalement, rapportés à quelques kilomètres horizontalement. Le potentiel hydrogéologique de la Guyane, ainsi que la structure et le fonctionnement des masses d'eaux souterraines, sont étroitement liés à la géologie du district. Ainsi, deux grands types de masses d'eau souterraines sont présentes en Guyane : les masses d'eau du socle (fissuré et fracturé) et celles des formations sédimentaires (poreuses) qu'elles soient situées le long du littoral ou d'extension très réduite le long des cours d'eau, dans les alluvions récentes.

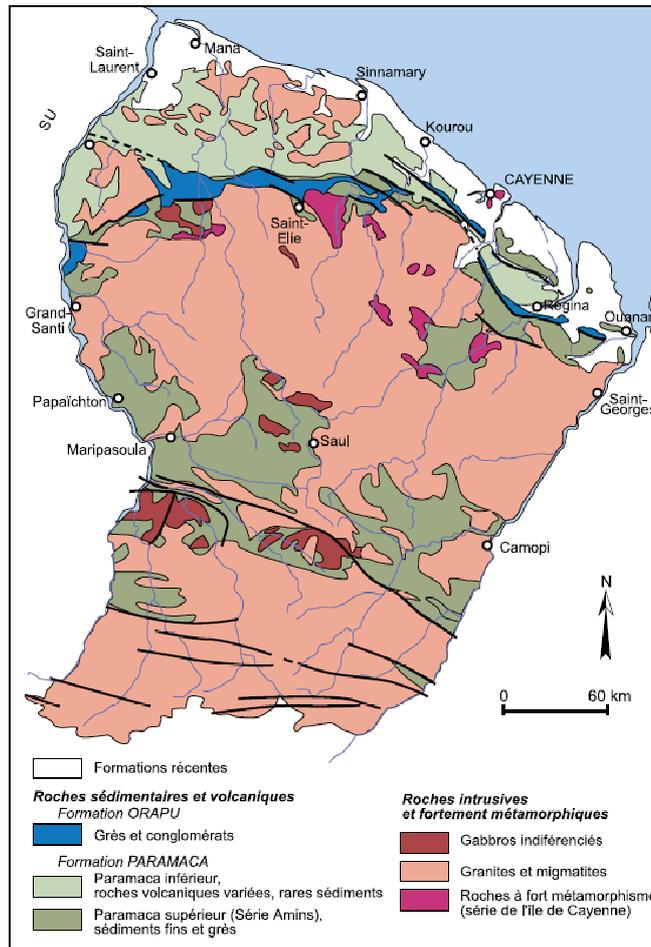


Illustration 26 : Carte géologique synthétique de la Guyane française (B. Choubert, 1974, Y. Vernhet et al., 1992).

3.1. CONCLUSION

La Guyane est globalement très largement dotée en eau et ne connaît donc pas de réel problème d'eau, tout au moins en ce qui concerne l'aspect quantitatif. Les ressources en eau souterraine sont encore mal-connues car relativement peu sollicitées. Cependant, celles-ci pourraient s'avérer utiles pour l'approvisionnement de petites agglomérations ou pour palier des problèmes de qualité d'eau de surface. En conséquence, le changement climatique (seul) ne devrait pas apporter de changement significatif ni de pression supplémentaire sur les ressources en eau de ce département.

4. 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 qui suivent, on présentera successivement le contexte géologique de la Martinique puis les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères présents au sein de ces formations.

4.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIE

La Martinique, dont les terrains les plus anciens 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 (Illustration 27):

- 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.

L'illustration 28 résume l'essentiel de la formation géologique de l'île. Pour plus de détail on se reportera au rapport BRGM/RP-55099-FR de juin 2007.

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 pluri décamétrique. Ces dernières sont peu nombreuses et confinées dans la moitié supérieure du cône.
- Au cœur de la caldeira d'effondrement 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 variées, 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.

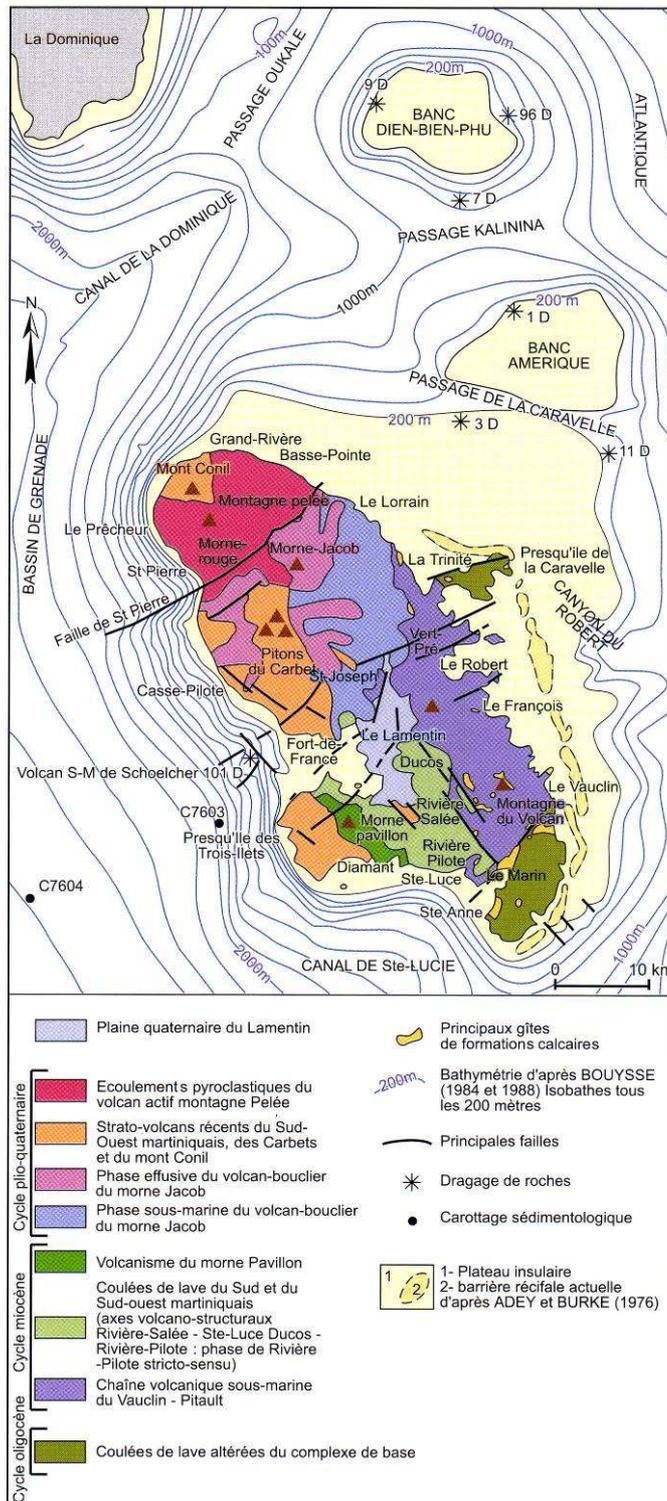


Illustration 27 : esquisse géologique et structurale de la Martinique, d'après Westercamp, 1990

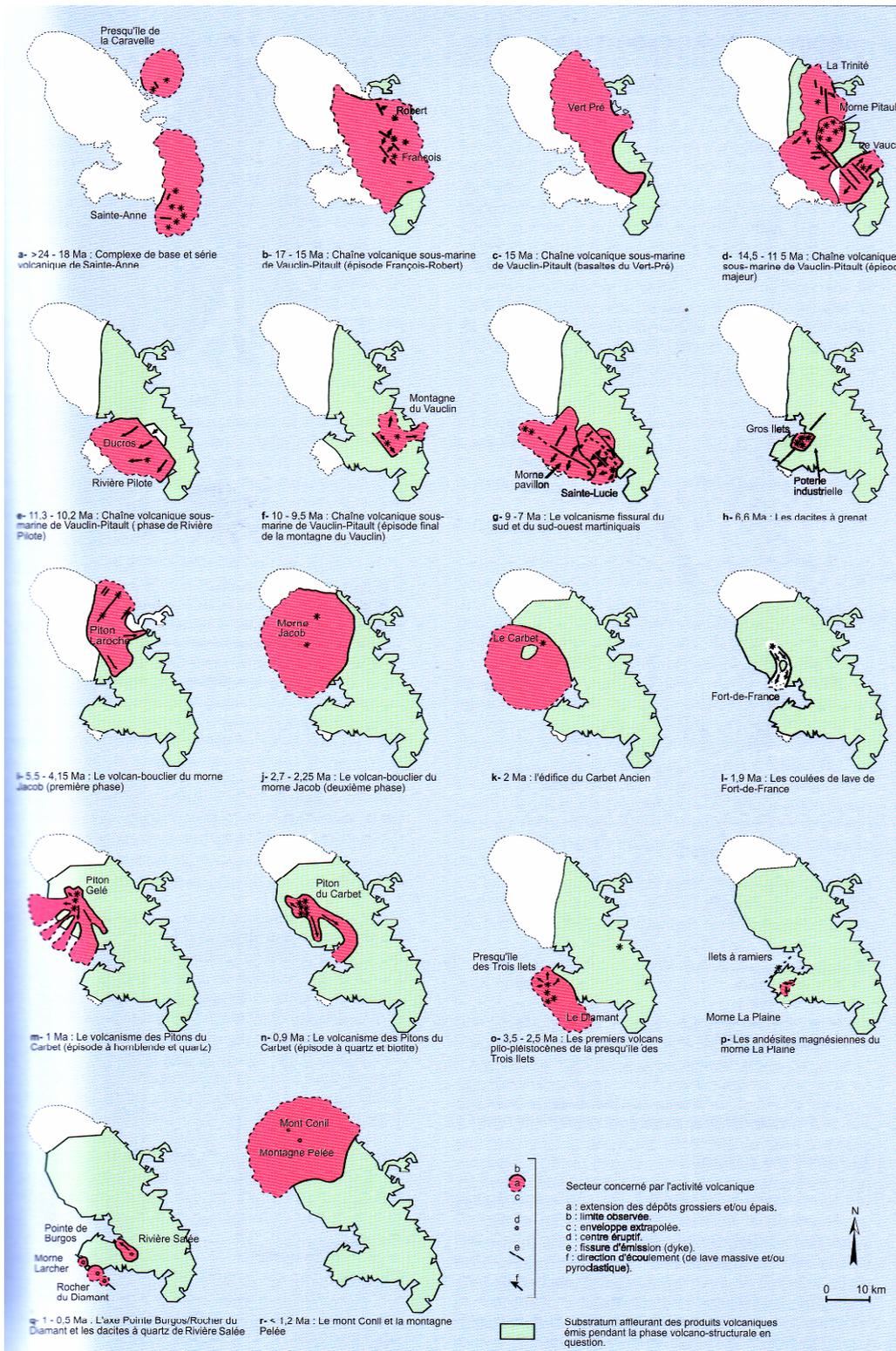


Illustration 28 : histoire géologique de la Martinique (Andrieuff et Al, 1988)

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 inter stratifiées 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 intermédiaires et récents 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.

4.2. 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 présente pas de grands aquifères continus aux limites facilement identifiables. En effet, bien que le facteur « lithologie » soit déterminant quant aux propriétés hydrauliques d'une formation géologique, la très forte hétérogénéité des séries volcaniques, particulièrement celles mises en place en contexte aérien, ainsi que le rôle important joué par la fracturation contribuent à une très forte variabilité spatiale des propriétés hydrogéologiques. Le relief accusé ainsi que les effets de l'altération accentuent cette variabilité.

La description des aquifères ci-dessous s'appuiera donc sur une approche lithologique, basée sur l'expérience acquise en Martinique et illustrée de résultats obtenus lors de prospections hydrogéologiques.

Les formations volcaniques et volcano-sédimentaires présentent, du fait de leurs conditions de mise en place (en milieu aérien ou sous une faible tranche d'eau) ou des processus d'érosion qui suivent leur dépôt, une très forte variabilité latérale et verticale. Par ailleurs, ces roches sont soumises à des processus d'altération qui transforment leurs caractéristiques hydrogéologiques primaires et

accentuent ces hétérogénéités : altération d'origine climatique, très développée sous climat de type tropical humide, altération hydrothermale, fréquente en contexte de volcanisme actif.

L'essentiel de la perméabilité de ces formations est assuré par la fracturation, même si, dans certains cas, les perméabilités d'interstices ou de fissures peuvent être prépondérantes. Dans un tel contexte, seule la réactivation régulière de cette fracturation, par le jeu d'une tectonique active, est susceptible d'assurer la pérennité de la perméabilité des fractures.

Par ailleurs, dans le contexte de la Martinique, mis à part l'édifice de la Montagne Pelée, les structures de type « paléo vallées » 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.

4.2.1. LES LAVES

Propriétés hydrogéologiques

Les propriétés aquifères des laves dépendent étroitement de leur degré d'altération et de leur état de fissuration et de fracturation.

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. Dans le cas de coulée de lave relativement fluide, les faciès de bordure (brèches et scories des murs, toit et flancs de coulée) présentent, du fait de leurs porosités et perméabilité initiales, une plus forte aptitude à s'altérer rapidement que le cœur de l'écoulement plus massif en raison de son refroidissement plus lent. 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).

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.

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) et qui jouent probablement un rôle « capacitif ». Plusieurs ouvrages présentent une forte transmissivité (voisine de $5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 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 7.10^{-3} et 2.10^{-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 $18 \text{ m}^3/\text{h}$ 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 de petit diamètre, a pu être testé à un débit d'environ $15 \text{ m}^3/\text{h}$.
- 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** ainsi qu'au **Carbet**. Au droit de ces trois sites, les transmissivités mesurées lors des pompes d'essai oscillent, entre $5 \cdot 10^{-4}$ et $1 \cdot 10^{-3}$ m²/s et autorisent des débits d'exploitation de l'ordre de 40 à 50 m³/h par ouvrage. 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 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 est constitué par les andésites du Morne Jacob 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 « paléo vallée » 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).

4.2.2. 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 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 pluri métrique) 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 une perméabilité d'interstices digne d'intérêt pour la prospection hydrogéologique. Constituées essentiellement de produits juvéniles, ces formations s'altèrent 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 paléo vallée, 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 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 paléo vallées, 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 « inter stratifié » 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 paléo vallées. 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'emmagasinement 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 $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, coefficient d'emmagasinement 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.

4.2.3. 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 inter stratifiées 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 inter- stratifiées 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 inter stratifiées, de bonnes propriétés hydrodynamiques (transmissivité voisine de $8.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour 30 m de hauteur mouillée, coefficient d'emmagasinement de 0,2% environ ; un des forages pouvant être exploité à plus de $30 \text{ m}^3/\text{h}$).

Les variabilités des résultats obtenus dans les années 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 $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 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.

4.2.4. LES 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 (figures de desquamation en pelures d'oignon). Les conglomérats 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.

4.2.5. LES CALCAIRES (ORIGINE SEDIMENTAIRE)

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).

4.2.6. LES FORMATIONS SUPERFICIELLES RECENTES

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.

4.3. 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, d'un suivi en continu des débits d'exhaure 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).

4.3.1. ELEMENTS SUR LA STRUCTURE DES AQUIFERES DE MARTINIQUE

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 ont été regroupées au sein d'une même UCA quand leurs caractéristiques géologiques et hydrogéologiques étaient similaires et que ces formations étaient directement superposées :

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 »

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.

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

A chaque UCA a été attribuée une fourchette de « débit potentiel instantané » par forage 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 (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 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. Des extrapolations ont été réalisées en fonction des connaissances disponibles sur la lithologie et la structure de la formation géologique constitutive de l'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 29. Chaque unité est ainsi redécoupée selon son niveau de superposition (niveau « stratigraphique »).

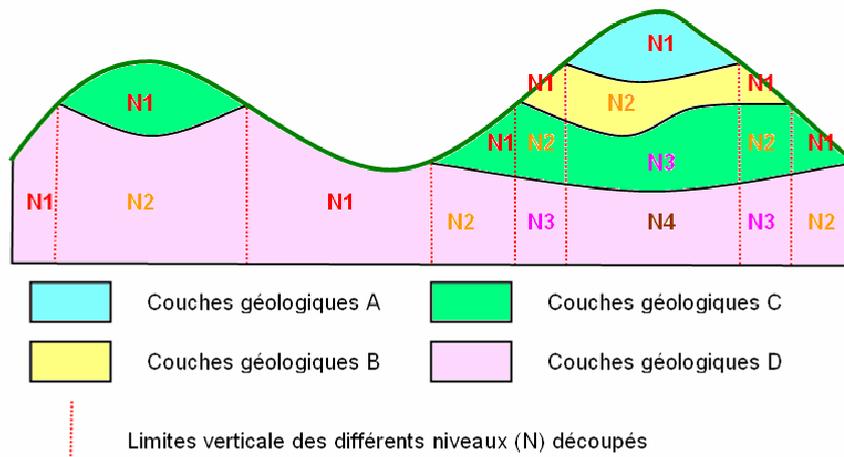


Illustration 29 : Principe de découpage en niveau des unités hydrogéologiques

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. La carte suivante représente les UCA ainsi calculées pour le niveau 1.

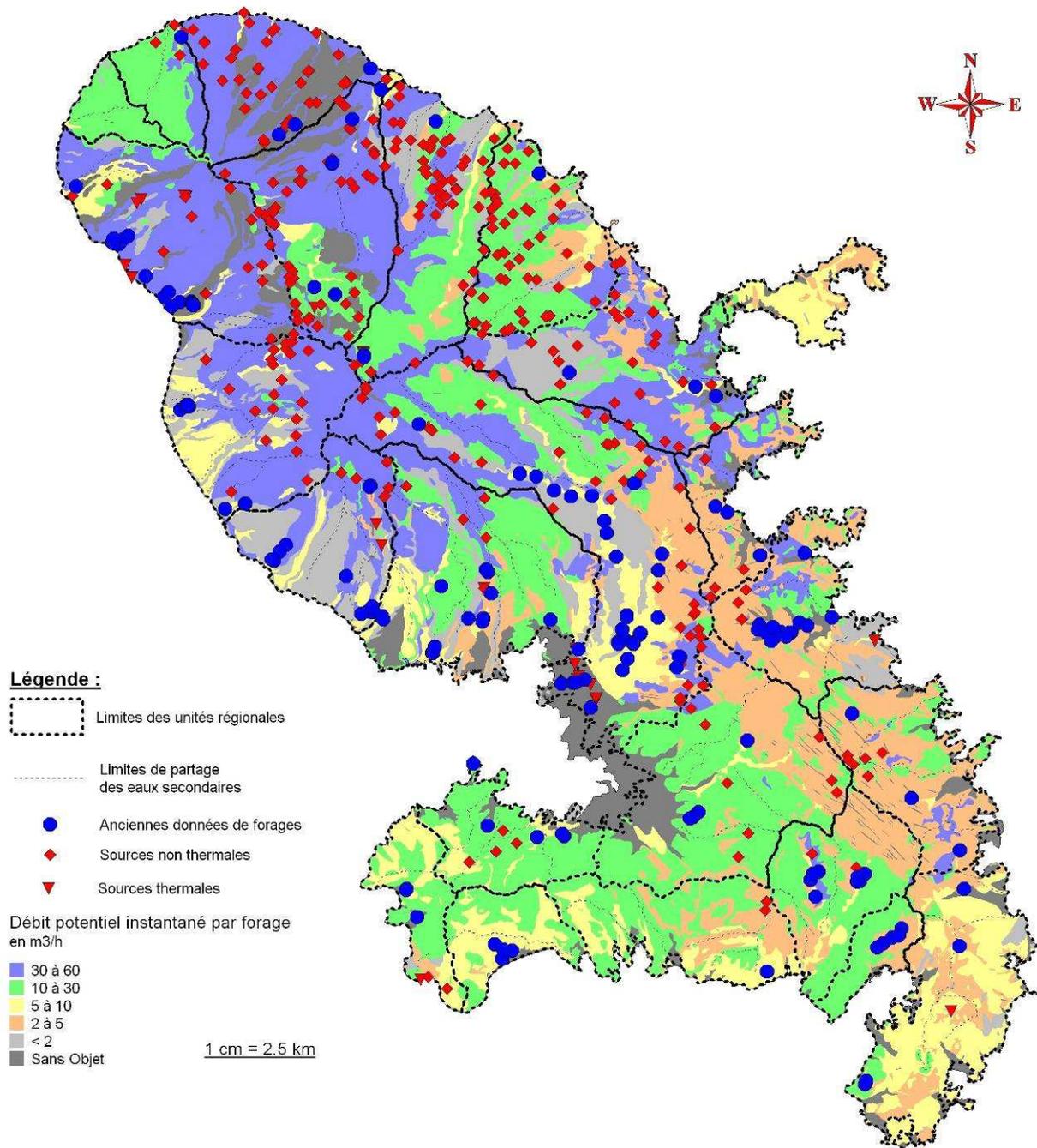


Illustration 30 : Débit potentiel instantané par forages, pour les unités de niveau 1 (formations affleurantes).

4.3.2. ELEMENTS SUR LE FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES DE MARTINIQUE

Des éléments de caractérisation du fonctionnement des aquifères de Martinique sont décrits au sein du présent chapitre selon un plan qui suit globalement celui du cycle de l'eau : entrées (infiltration) au sein des aquifères, modalités de circulation des eaux souterraines en leur sein, sorties d'eau souterraine. Ces modalités de fonctionnement permettent notamment de définir les limites des aquifères et de caractériser la nature de celles-ci.

Le fonctionnement de chacun des aquifères de Martinique n'étant pas connu dans le détail, et le degré de cette connaissance pouvant être variable d'un aquifère à l'autre, ces éléments de connaissance ne sont pas nécessairement homogènes à l'échelle de l'ensemble de la Martinique.

En Martinique, les entrées sont aujourd'hui considérées comme généralisées à toute la surface des nappes libres, ainsi qu'aux zones d'affleurement des nappes captives (partie libre des nappes captives). L'alimentation des aquifères peut aussi se faire par des processus de drainance, notamment au travers de formations semi-perméables (formations sus- ou sous-jacentes à l'aquifère, considérées comme non aquifères, telles que les formations superficielles : alluvions, colluvions, franges altérées des roches constituant les aquifères, etc.) ou dans le cadre des échanges « rivières vers nappe » (les cours d'eau non pérennes du flanc ouest de la Montagne Pelée constituent ainsi un exemple bien représentatif de ce type de configuration). L'exploitation ou la mise en exploitation de certains aquifères est susceptible d'augmenter (en termes de débit échangé et d'extension spatiale des zones d'échange) ces échanges 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 prélèvements par pompage, qui constituent aussi des sorties, sont pour l'instant très réduits (seulement 4 forages sont actuellement exploités). Les sorties naturelles des aquifères s'opèrent 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 manière ponctuelle au droit des sources. Certaines zones humides matérialisent aussi ces échanges nappes / eaux de surface.

4.3.2.1. ALIMENTATION DES AQUIFERES (ENTREES)

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

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 » 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.

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.

4.3.2.2. LIMITE DES BASSINS VERSANTS HYDROGEOLOGIQUES. CONCEPT D'UNITES REGIONALES

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 entre bassins versants topographiques et bassins versants souterrains.

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. 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;
- 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.

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.
- 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 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.

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 l'Illustration 31.

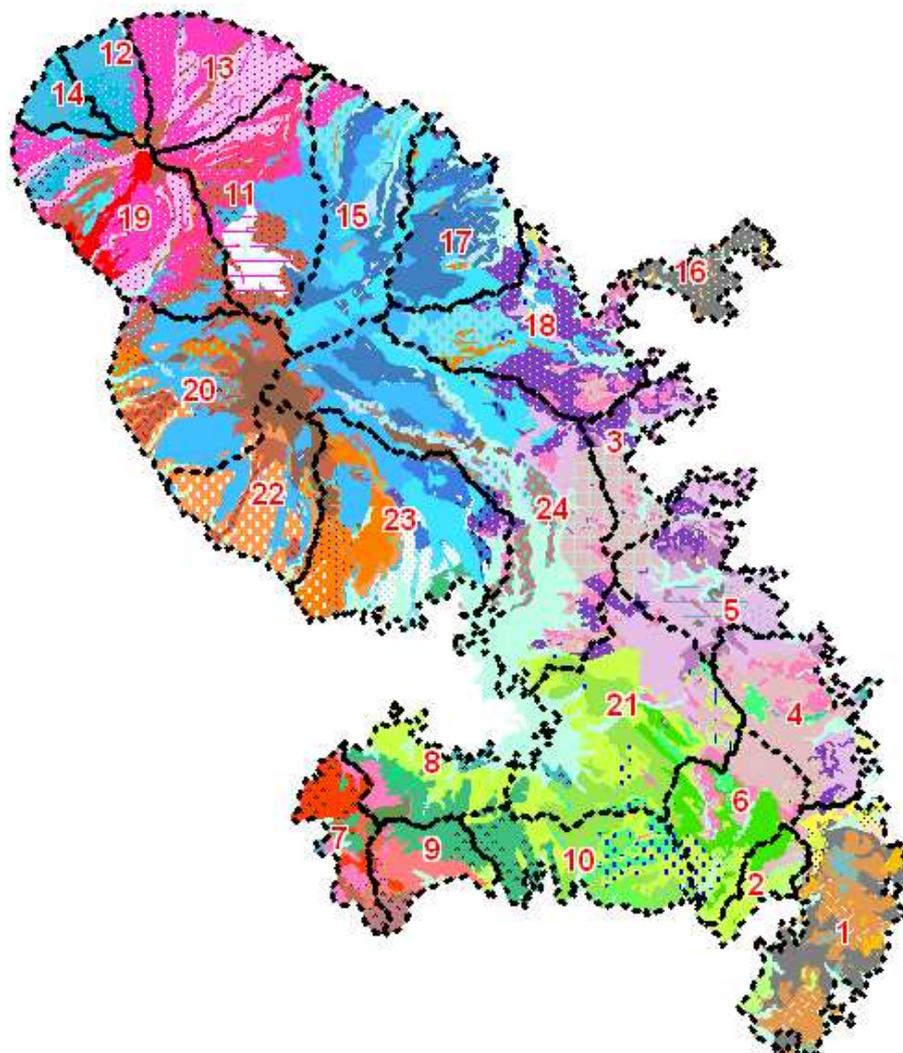


Illustration 31 : Carte des unités régionales (avec le numéro de chaque UR), sur fond de la carte géologique au 1/50000^{ème}

4.3.2.3. 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

On distingue principalement (Illustration 32) deux types de sources:

- 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.

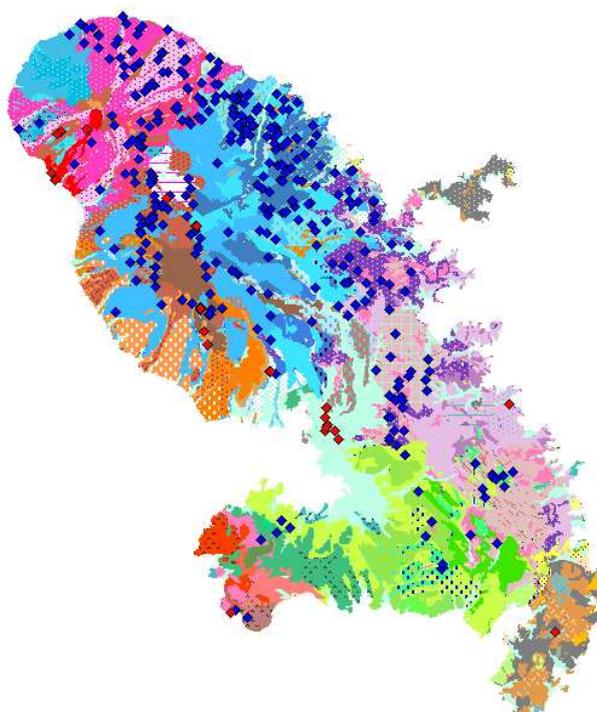


Illustration 32 : Localisation des sources thermales et/ou minérales (en rouge) et des sources non thermales (en bleu), sur la carte géologique au 1/50000^{ème}

354 sources ont ainsi été identifiées comme « 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 Champflore.

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.

29 sources thermales et/ou minérales ont été recensées.

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.

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 (Illustration 33), qui s'écoulent toutes l'année, se classent donc dans cette catégorie.

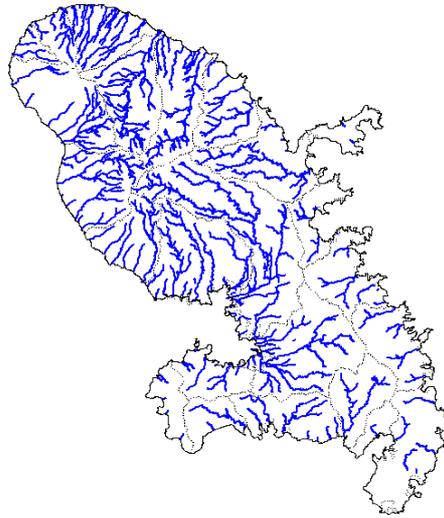


Illustration 33 : Cours d'eau pérennes (Source : DIREN)

- **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.

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 4.4.4.2.

4.4. EVALUATION QUANTITATIVE GLOBALE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DE LA MARTINIQUE

4.4.1. INTRODUCTION

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

La méthode adoptée repose sur une modélisation en deux étapes :

- 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).
- modélisation 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).

4.4.2. CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE DE LA MARTINIQUE

4.4.2.1. PLUVIOMETRIE

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.

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. 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).

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 34). 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).

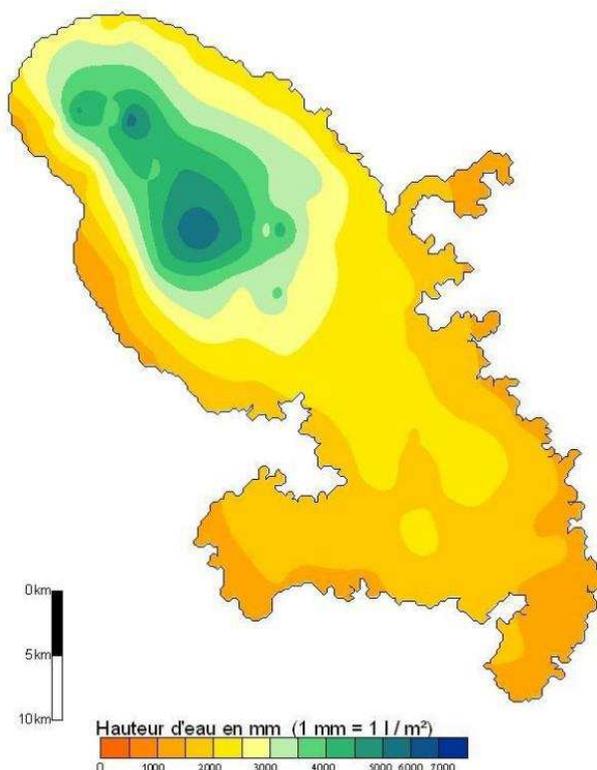


Illustration 34 : Pluviométrie moyenne annuelle en Martinique (1915-2006) en mm/an
(source : MétéoFrance, juin 2006)

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.

L'évolution de la pluviométrie avec l'altitude sur la côte « au vent » est assez linéaire. 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 :

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

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.

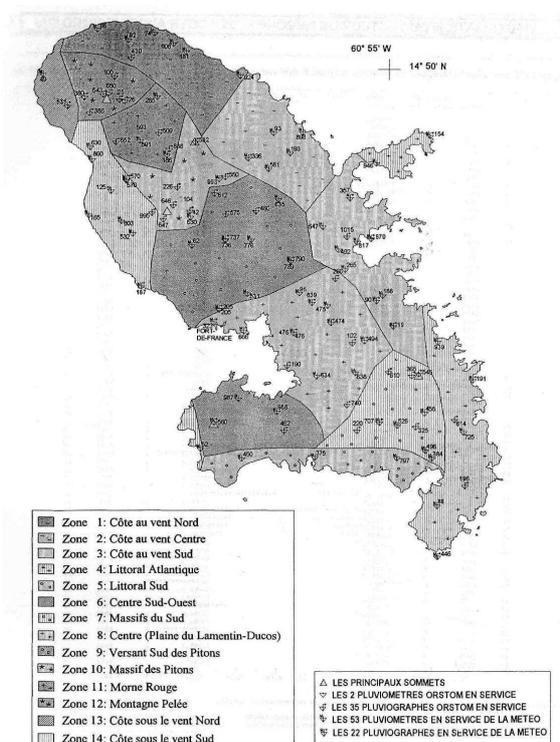


Illustration 35: Découpage de la Martinique en 14 Zones Pluviométriquement Homogènes
Source : Mobèche, IRD (2003)

4.4.2.2. 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.

Comme pour la pluie, cette répartition saisonnière se double d'une répartition zonale (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) mise en évidence par les cartes d'ETP cumulées annuelle.

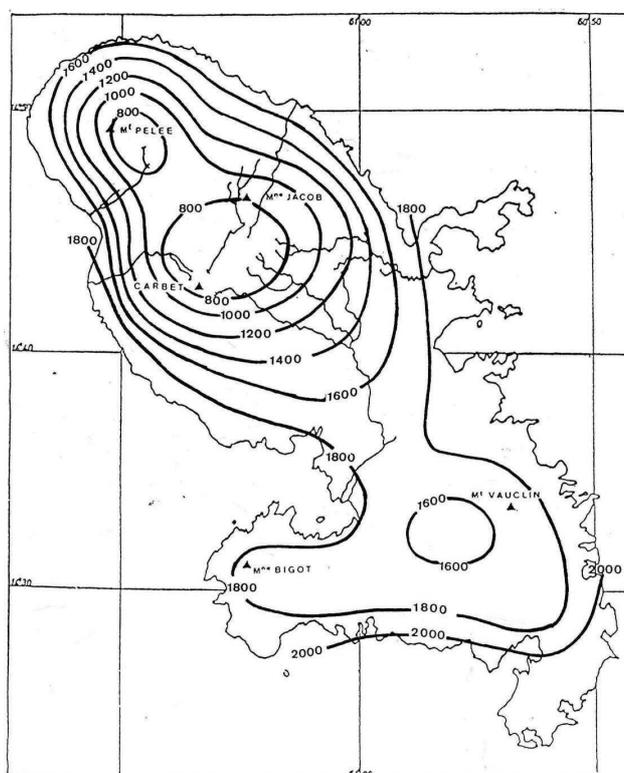


Illustration 36: Evapotranspiration moyenne annuelle en Martinique entre 1961 et 1980 en mm/an
Source : Reguieg (1986)

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.

La carte d'iso-ETP (Illustration 36) 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. Elles sont comparées à celles déterminées à la Réunion où un gradient altimétrique égal à $-67,3 \text{ mm/an}/100 \text{ m}$ a été mis en évidence (Enilorac, 1986) (Illustration 37).

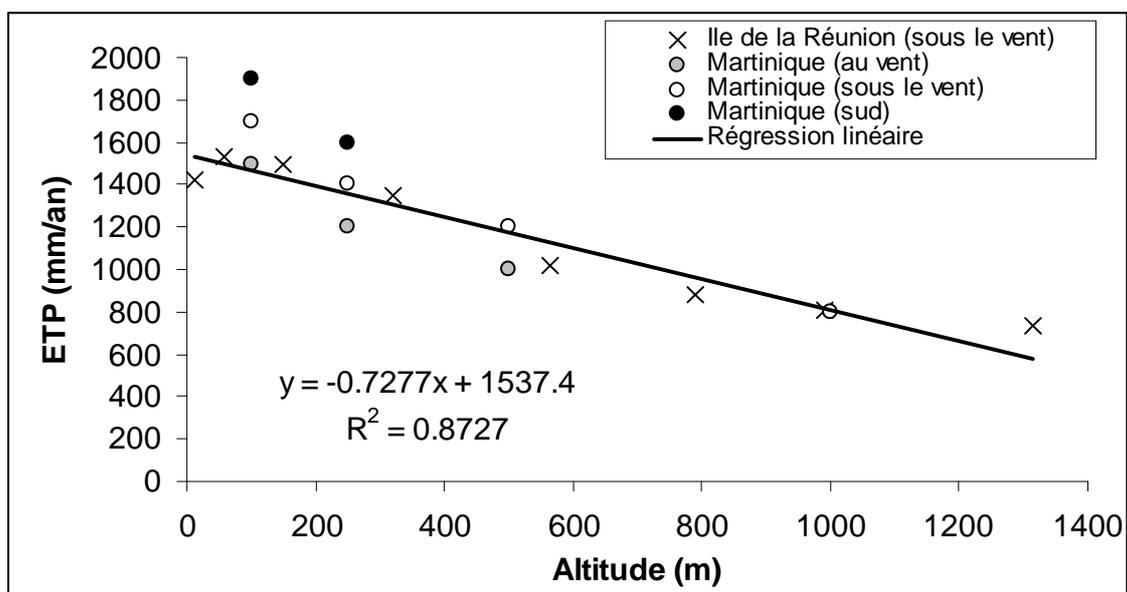


Illustration 37 : Évolution de l'ETP en fonction de l'altitude en Martinique et à la Réunion

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 $73 \text{ mm} / 100 \text{ m}$.

4.4.2.3. 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 Illustration 38).

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

Illustration 38 : 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, décadaire voire journalier.

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.

À des altitudes faibles, dans les régions proches de la côte, la pluie efficace (P_{eff} = Pluie diminuée de l'ETR, c'est-à-dire eau disponible pour le ruissellement, l'infiltration et le sol) est quasi nulle.

4.4.3. 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 4.4).

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

4.4.3.1. PRINCIPE GENERAL DE L'APPROCHE DE MODELISATION 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 hydro système.

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 hydro système à partir de concepts reposant à la fois sur la description de l'hydro système et l'application de lois de la physique, la modélisation inverse décrit le fonctionnement d'un hydro système 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.

4.4.3.2. APPLICATION A 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, etp et débits validés) au pas de temps journalier concomitantes de plusieurs années recouvrant des périodes sèches et humides.

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 39) ;
- 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.

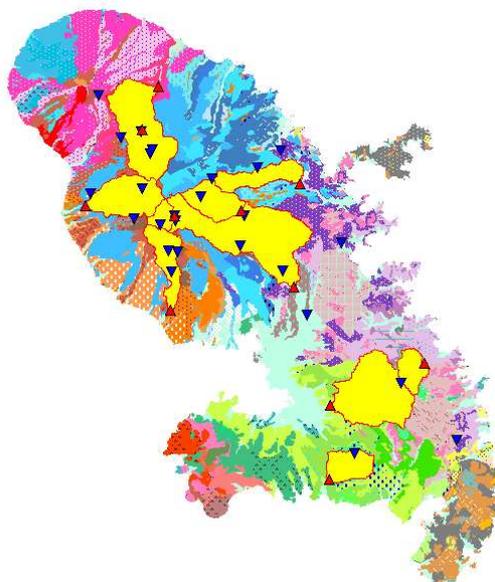


Illustration 39 : Localisation des bassins versants (en jaune), des stations hydrométriques (en rouge) et des stations pluviométriques (en bleu).

4.4.3.3. SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS PAR L'APPROCHE DE MODELISATION 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 40.

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 40 : Synthèse des résultats des modélisations TEMPO

4.4.4. MODELISATION GLOBALE DES RESSOURCES EN EAU

4.4.4.1. PRINCIPE DE LA MODELISATION GLOBALE

a) Méthodologie

Une **approche globale** a été choisie pour établir le bilan hydrologique de la Martinique.

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.

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.

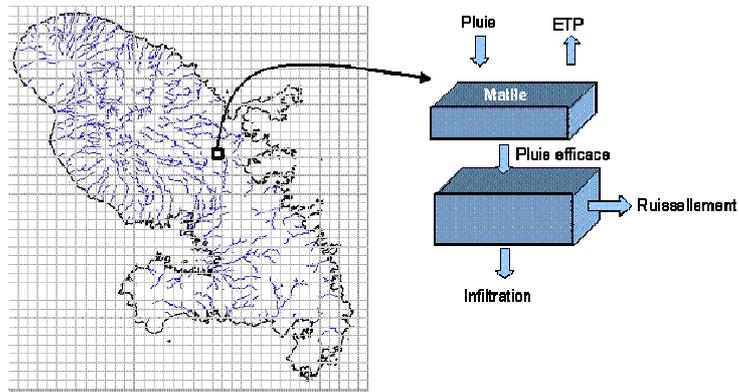
Ainsi, la Martinique est discrétisée en 1096 mailles carrées de 1 km², pour chacune desquelles le bilan hydrique du sol, l'infiltration et le ruissellement sont calculés (ce qui correspond aux deux premiers réservoirs du modèle). L'île est ensuite découpée en une vingtaine d'Unités Régionales (équivalentes aux UH décrites ci-dessus) à l'échelle desquelles les résultats obtenus à l'étape précédente sont agrégés. 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 41).

b) Calcul de la pluie efficace

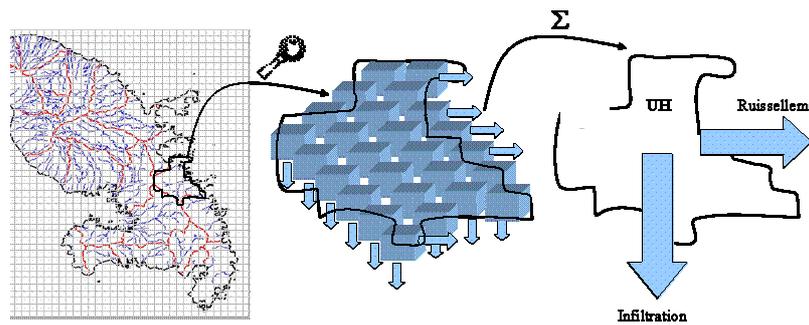
La pluie efficace (*P_{eff}*) est la quantité d'eau (en mm) disponible pour le ruissellement, l'infiltration, et plus modestement la saturation des sols superficiels. Elle dépend de la pluviométrie (pluie nette), de l'évapotranspiration réelle (ETR, en mm) et du stock d'eau dans le sol (Réserve Utile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

La pluie efficace et l'ETR ont été estimées par bilan hydrologique du sol selon le modèle de Thornthwaite (voir Illustration 42).

1) Bilan hydrique du sol au niveau de chaque maille de 1 km²



2) Agrégation du ruissellement et de l'infiltration au niveau de chaque UR



3) Estimation du stock d'eau dans la nappe et du débit à l'exutoire pour chaque UR

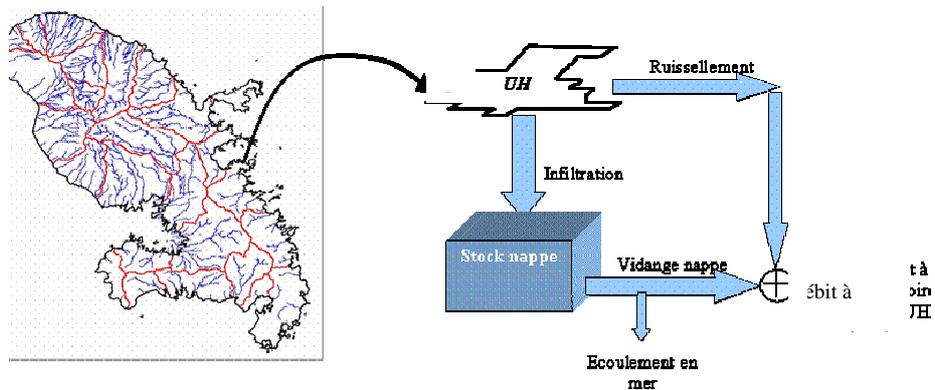


Illustration 41 : Discretisation spatiale puis agrégation de l'infiltration et du ruissellement à l'échelle des UR

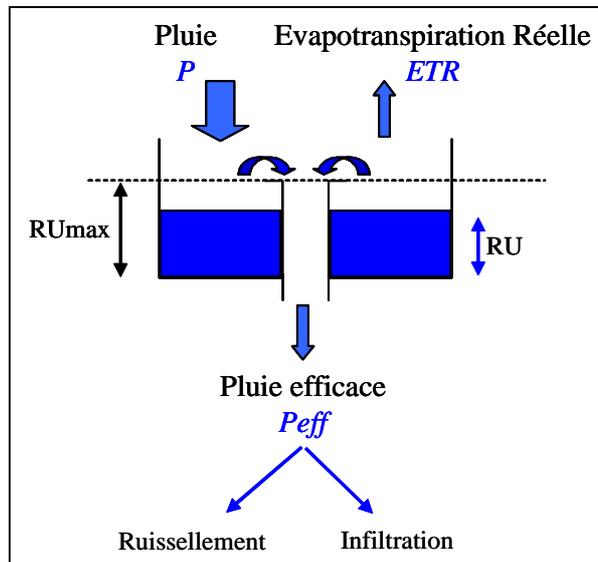


Illustration 42: Principe du calcul de la pluie efficace

L'ETR est toujours inférieure ou égale à l'ETP. 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 $P - ETR$.

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

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

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

$$\text{Si } P_{eff}^n \leq 0 \text{ alors } P_{eff}^n = 0$$

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

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 K_c tel que : $ETR \text{ corrigée} = K_c * ETR$.

Dans notre modèle appliqué à chaque maille (1 km²), le bilan hydrique est effectué dans le réservoir supérieur (réservoir « sol »).

c) 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.

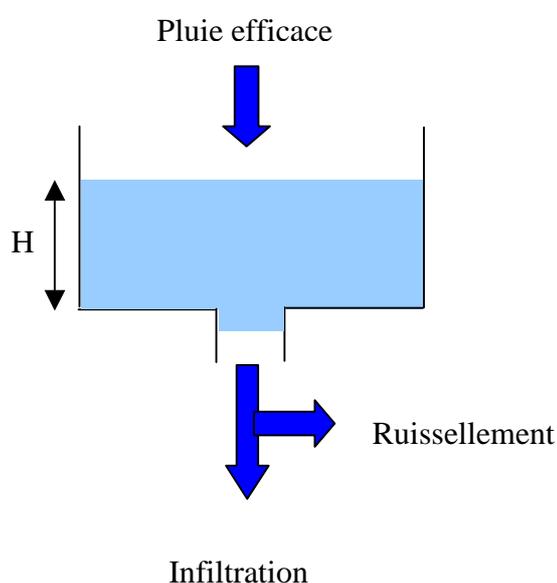


Illustration 43 : Schéma du deuxième réservoir

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.

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.

d) 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).

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'emmagasinement). 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.

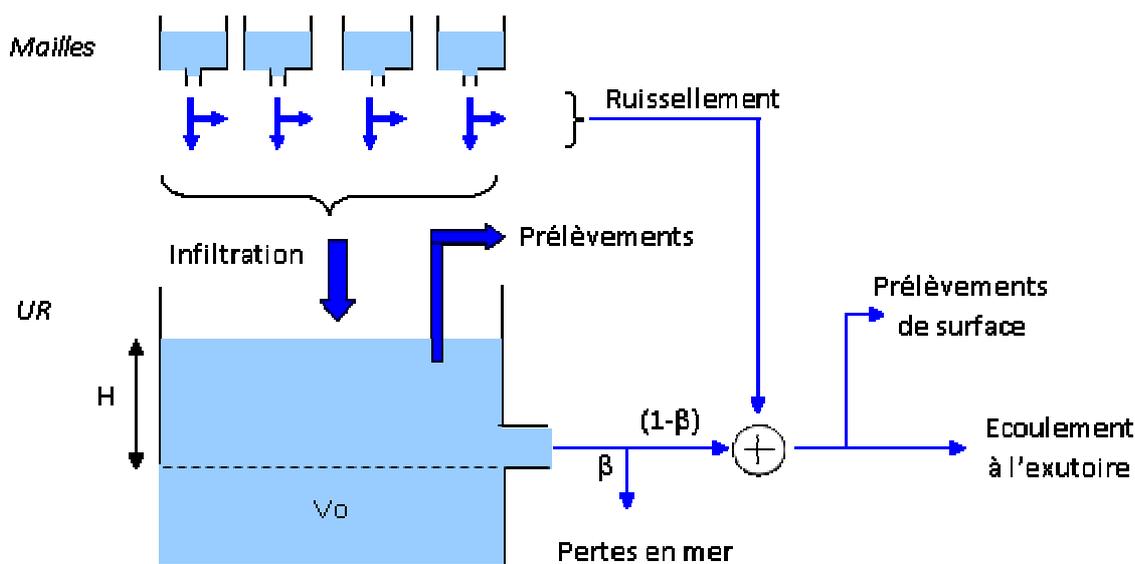


Illustration 44 : Schéma du troisième réservoir

4.4.4.2. APPLICATION A 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 / RUmax, 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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

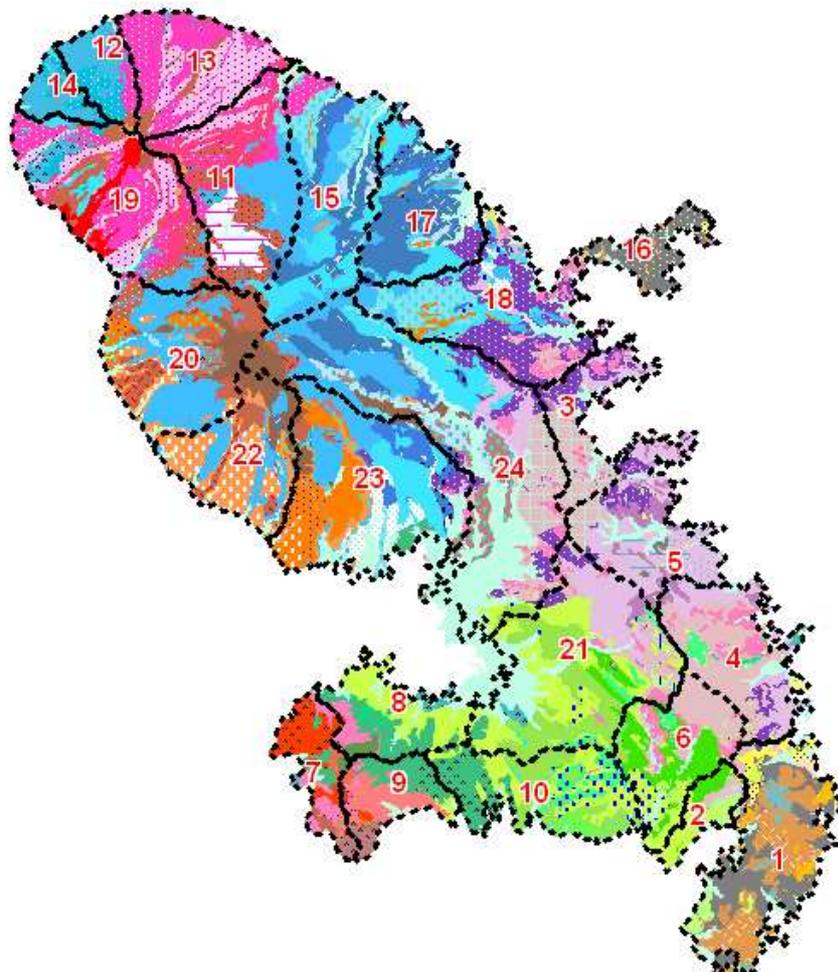


Illustration 45 : Découpage de la Martinique en 24 Unités Régionales

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.

- **chronique de pluie journalière par maille**

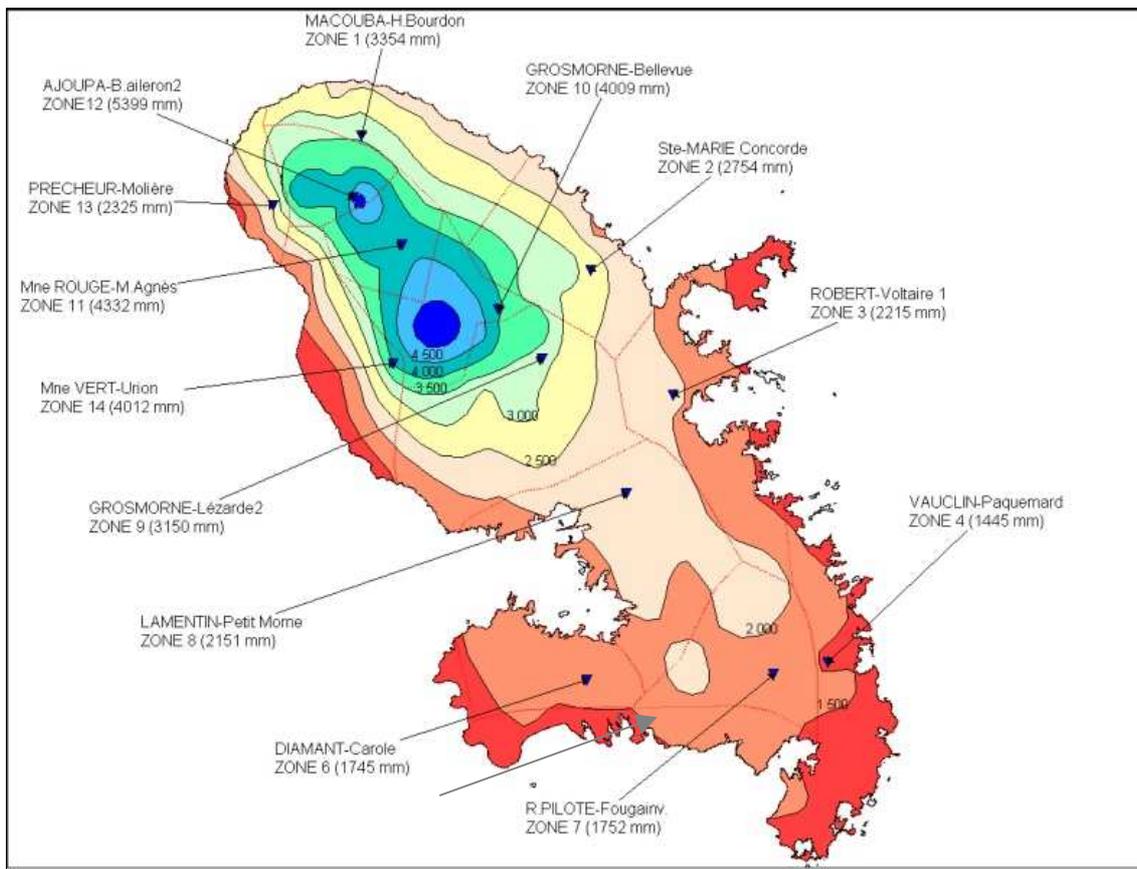


Illustration 46 : Isohyètes, zones pluviométriquement homogènes et pluviomètres de référence.

- **chronique d'ETP journalière par maille**

La démarche 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 à chaque maille de l'île, en la multipliant par le rapport entre l'ETP moyenne annuelle de la maille fournie par la carte des iso-ETP discrétisée et l'ETP moyenne annuelle à la station de Fort de France (1670 mm).

Etablissement de la carte des R_{Umax}

Cette carte des R_{Umax} (Illustration 47) est établie en croisant les données disponibles, à savoir une carte des classes de capacité de rétention des sols (faible, moyenne, forte) et 25 mesures ponctuelles de réserve utile maximale.

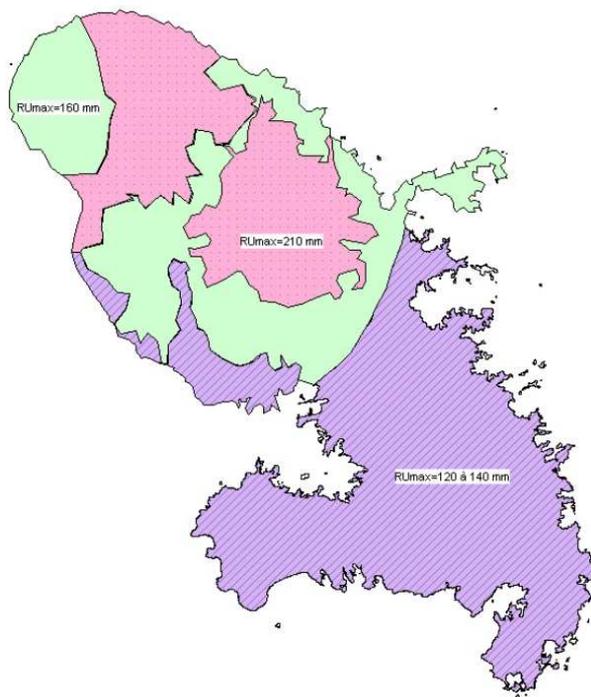


Illustration 47 : Carte des Réserves Utiles maximale des sols

- **Génération de chroniques de K_c**

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.

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 K_c.

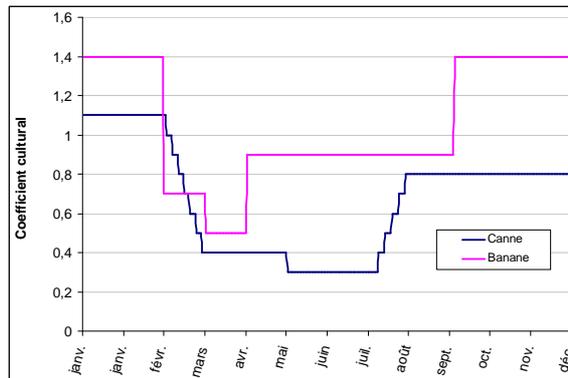


Illustration 48 : Variation des coefficients culturels de la canne et de la banane au cours de l'année

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 géologiques affleurantes.

Dans le cadre de cette étude, les valeurs des coefficients de ruissellement ont été estimées 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 49) est issue de la bibliographie (rapport BRGM/RP-54404-FR, 2006). Elle est définie à l'échelle de chaque maille. La contribution du sol et du sous-sol au ruissellement est en revanche imposée au niveau de chaque UR. Les valeurs de $coeff_sol$ ont été ajustées 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 49 : contribution de la pente au ruissellement

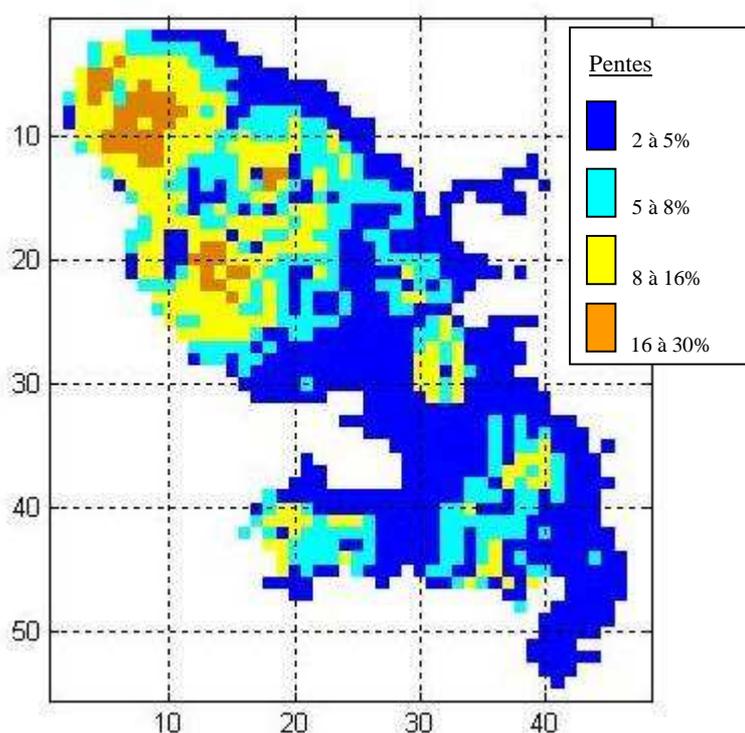


Illustration 50 : Carte discrétisée des pentes de la Martinique

- **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, comprises entre 0.71 et

1.25 j⁻¹, et les critères de convergence numérique du modèle. 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).

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

Les différentes UR ont été réparties, à dire d'experts, en 4 catégories selon leur temps de transit moyen dans la nappe τ_2 , en s'appuyant sur les résultats de la modélisation pluie-débit réalisée sur les quelques bassins instrumentés. Ces valeurs par défaut ont été modifiées 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 51 : Valeurs par défaut 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 paramètre β qui quantifie les fuites en mer, celles-ci étant inconnues car non mesurées ou estimées 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 52). On a donc défini un facteur de forme (F) pour chacune des UR, égal à la longueur du rivage de l'UR (L_{lit}) divisé par la somme de cette longueur et de la longueur du cours d'eau pérenne principal (L_{riv}).

$$F = \frac{L_{litt}}{L_{riv} + L_{litt}}$$

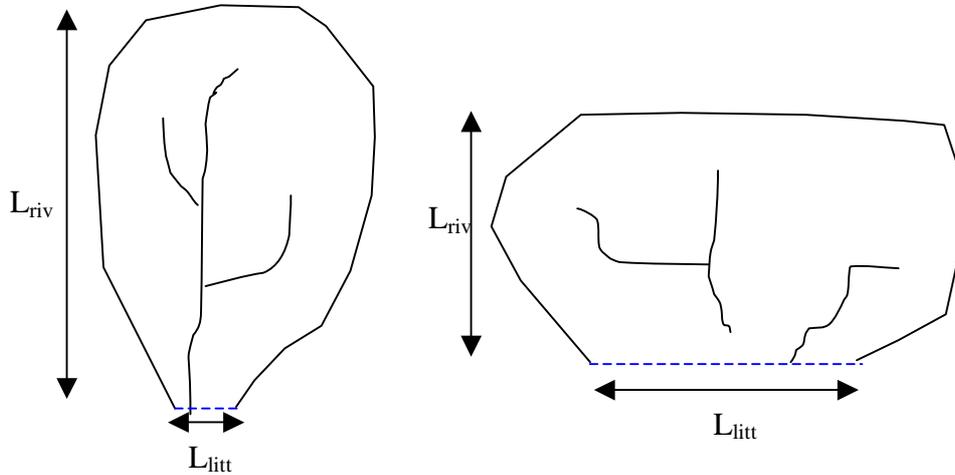


Illustration 52 : Définition du facteur de forme pour une UH

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.

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%	β^2	15%	15%	17%	13%	7%	16%	11%	4%

Illustration 53 : Facteur de forme de chaque UR

- **Les prélèvements d'eau**

² Cette UR correspond à la presque 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.

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).

Les prélèvements d'eau de surface pour l'AEP (captages de source ou prises d'eau en rivière, voir Illustration 54, 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 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 Schœlcher. 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 55).

Les captages pour irrigation sont quant à eux très mal connus. On dispose en effet de valeurs de débits³ 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.

³ Données DIREN

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 54 : 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 55 : Répartition mensuelle théorique des débits prélevés au sein des UR22 et 23

4.4.4.3. MODELISATION NUMERIQUE

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 56), 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.

b) Validation du simulateur

Différentes approches ont été mises en œuvre afin :

- 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.

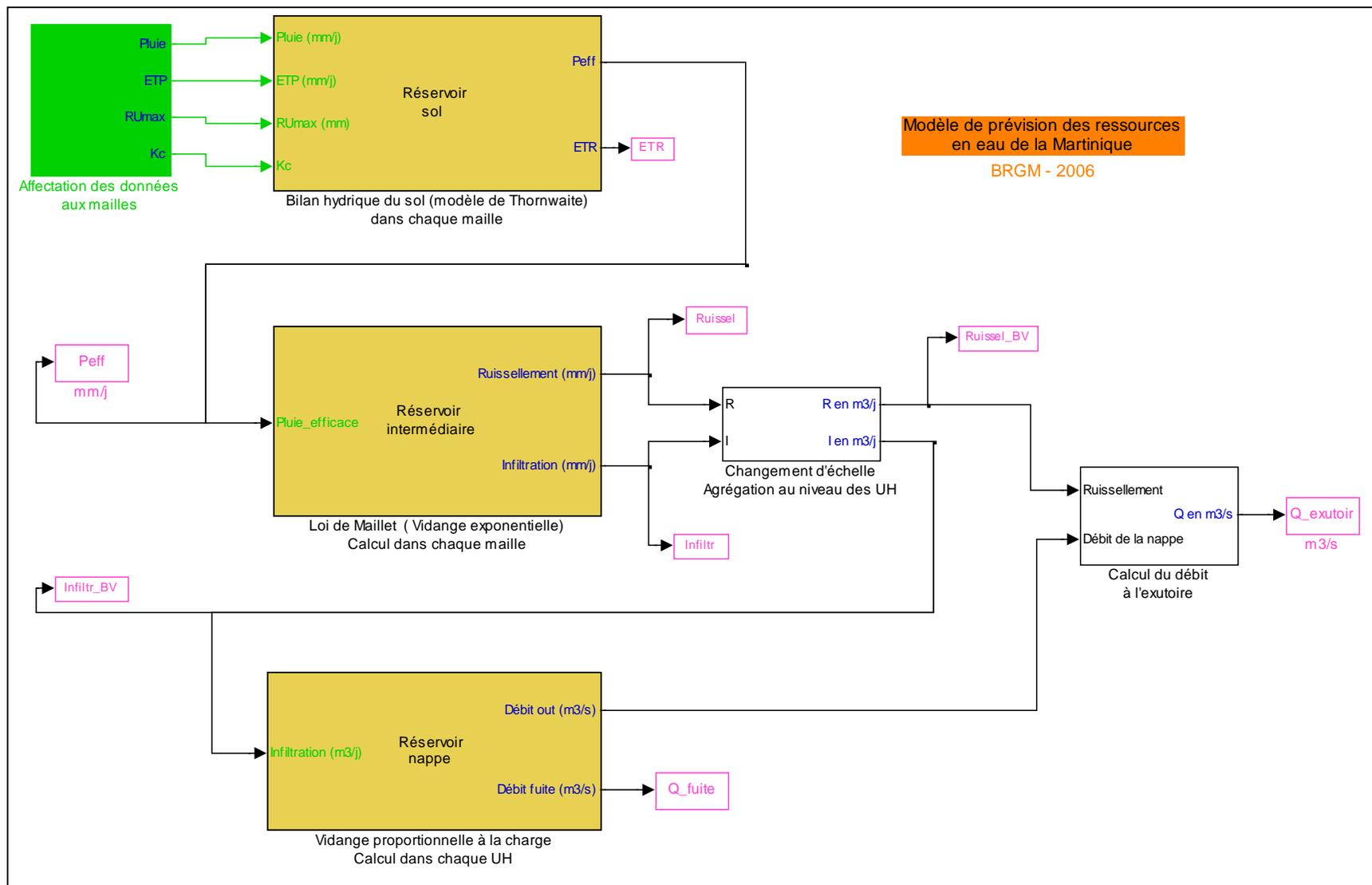


Illustration 56 : Capture d'écran du simulateur numérique

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

Calage du simulateur

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

Le calage a été réalisé par essais successifs en utilisant les données de débits disponibles sur la période simulée (1986-1997). Les points de mesure utilisés sont localisés sur l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

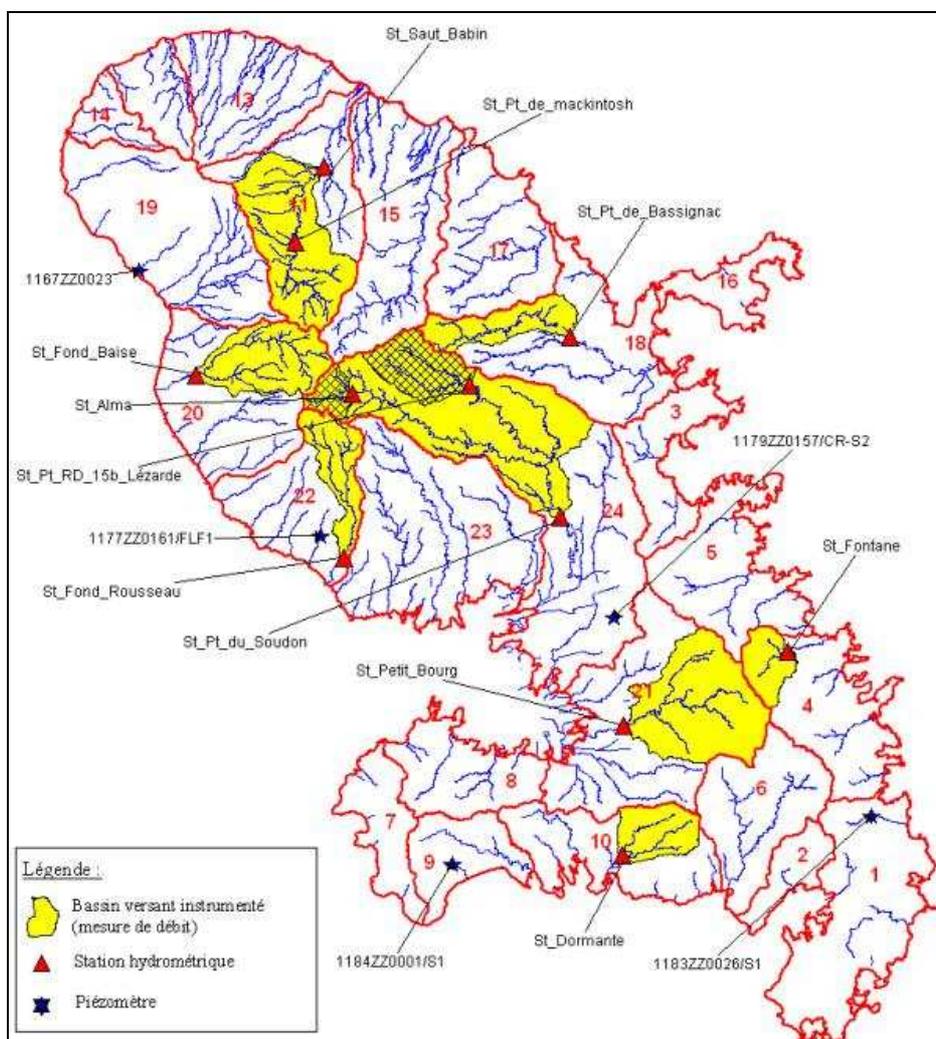


Illustration 57: Localisation des points de mesures exploitables (hydrométrie et piézométrie)

La cartographie des valeurs finales du coefficient de ruissellement est présentée sur l'illustration 58.

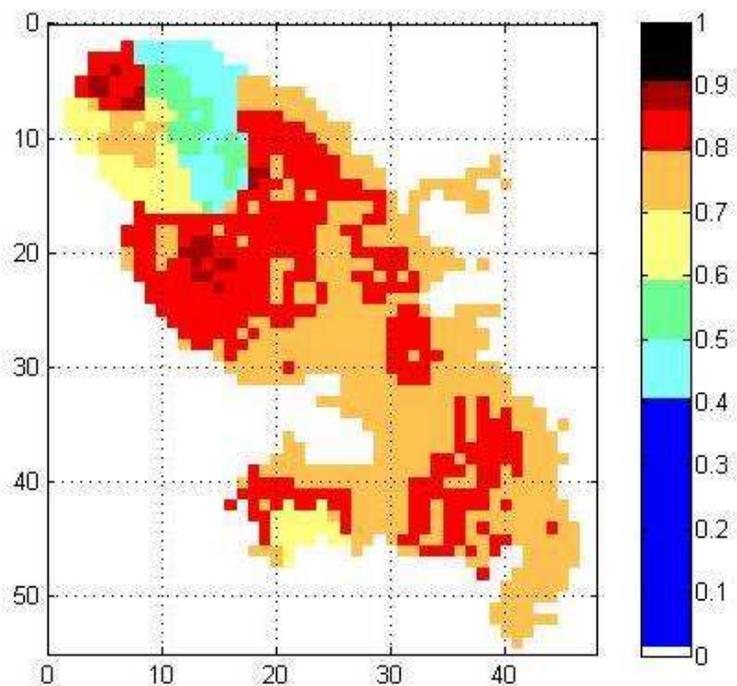


Illustration 58 : Carte des coefficients de ruissellement

Le jeu de paramètres retenu est présenté dans l'illustration 59.

	α moyen	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 59 : Jeu de paramètres calé

4.4.5. RESULTATS : EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU

4.4.5.1. 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**. On présente ci-dessous (*Illustration 60*) la carte de la pluie efficace moyenne annuelle sur cette période, obtenue à partir des valeurs moyennes calculées en chaque maille de 1 km².

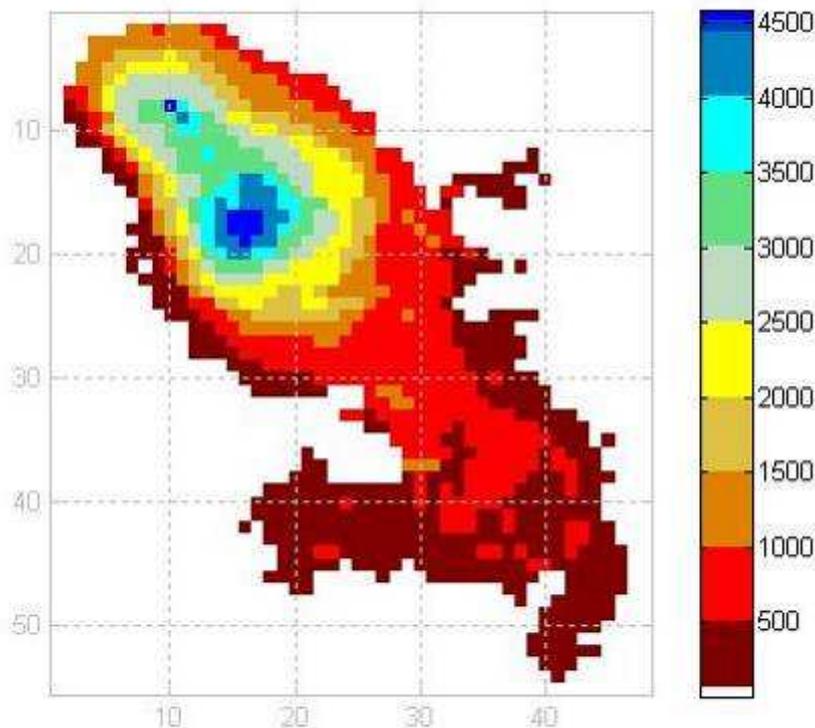


Illustration 60 : Carte de la pluie efficace moyenne annuelle (en mm)

4.4.5.2. BILANS PAR UNITÉ REGIONALE

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 61*. 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).

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

4.5. EVALUATION DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE POTENTIELLEMENT EXPLOITABLE EN MARTINIQUE

L'objectif de ce chapitre est de présenter la méthodologie mise en œuvre puis les résultats des simulations destinées à évaluer la ressource en eau souterraine potentiellement exploitable au sein des 24 unités régionales, et globalement. Il s'agit de la ressource potentielle théoriquement disponible telle qu'évaluée et calculée précédemment, ajustée aux contraintes d'exploitabilité telles que la productivité unitaire attendue des forages selon les formations (d'après données existantes, sans autres investigations spécifiques *in situ*), leur rayon d'influence, les impacts sur les écoulements de surface et les milieux, les contraintes d'accès liées à la topographie, à l'occupation du sol, etc.

4.5.1. METHODOLOGIE

La méthodologie mise en œuvre comprend schématiquement les principales étapes suivantes :

1. le nombre maximal de forages réalisable au sein de chaque unité hydrogéologique régionale a été défini en fonction des caractéristiques hydrogéologique de l'unité régionale concernée (notamment les débits attendus au sein des différentes UCA constitutives de chaque UR) et de critères concernant les superficies réellement utiles pour la réalisation de forages,
2. l'exploitabilité de ces forages a ensuite été vérifiée en fonction de la ressource en eau souterraine effectivement disponible et des impacts supposés de cette exploitation, déduite notamment du « modèle intégré » élaboré et décrit précédemment. Le cas échéant, le nombre réel de forages a été ajusté.

Pour connaître le détail de ces étapes et les hypothèses considérées, on consultera le rapport BRGM/RP-55099-FR de juin 2007.

4.5.2. RESULTATS

4.5.2.1. RESSOURCE POTENTIELLEMENT EXPLOITABLE PAR UNITE

Les Illustration 62 à 69 synthétisent les résultats des simulations pour chaque unité hydrogéologique.

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 62: 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 63 : Surface utilisable pour la réalisation de forages, par unité régionale et pour les différentes classes de forages

nom	Nombre de forages réalisables à :				Volumés prélevés 20h/24, 365 jours par an		Impact étiage rivière	Impact Ec en Mer	Part sup sur Er (gestion active)
	45 m3/h	20 m3/h	7.5 m3/h	3.5 m3/h	en mm	en m3/j			
							en %	en %	en %
Sainte Anne	0	0	5	15	11	1800	4%	1%	4%
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 64 : Nombre de forages potentiellement réalisables, volumes prélevés et impacts, par unité régionale

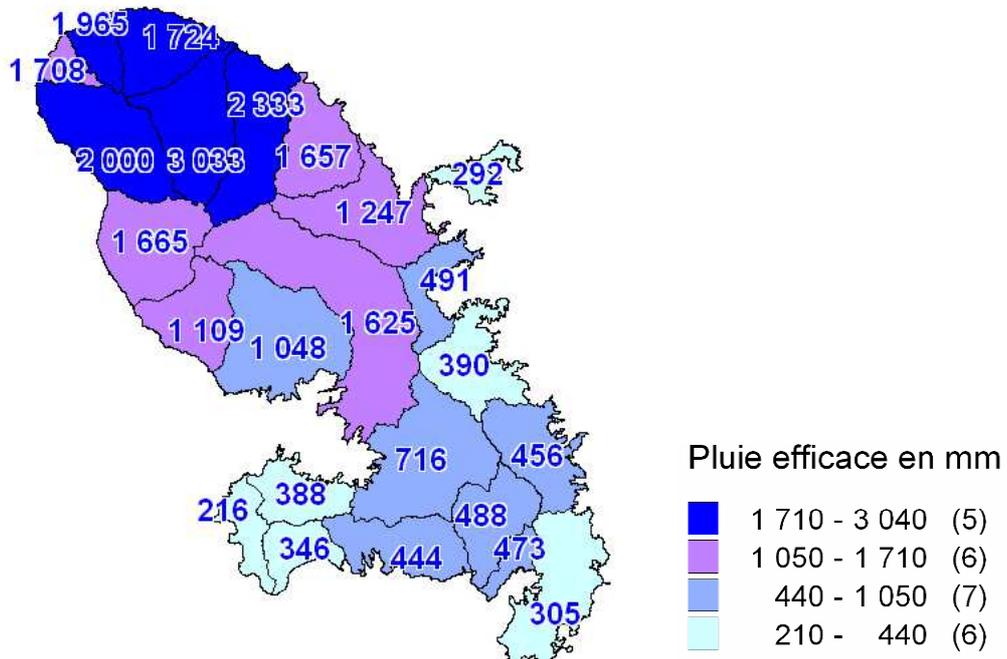


Illustration 65 : Variabilité spatiale de la pluie efficace par unité régionale

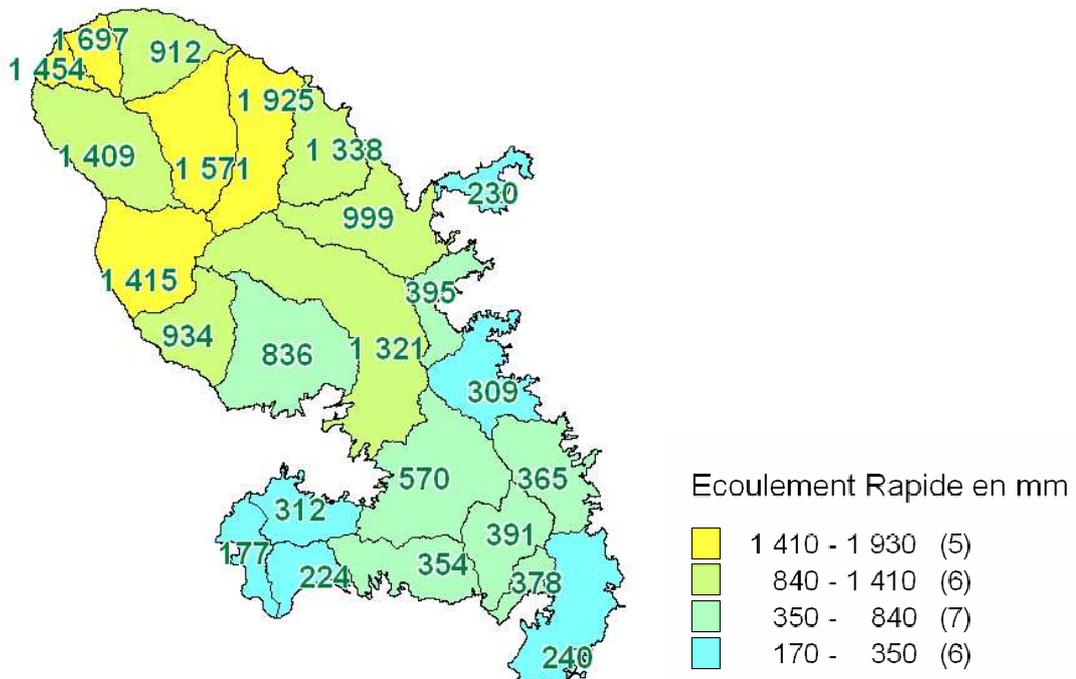


Illustration 66 : Variabilité spatiale de l'écoulement rapide, par unité régionale

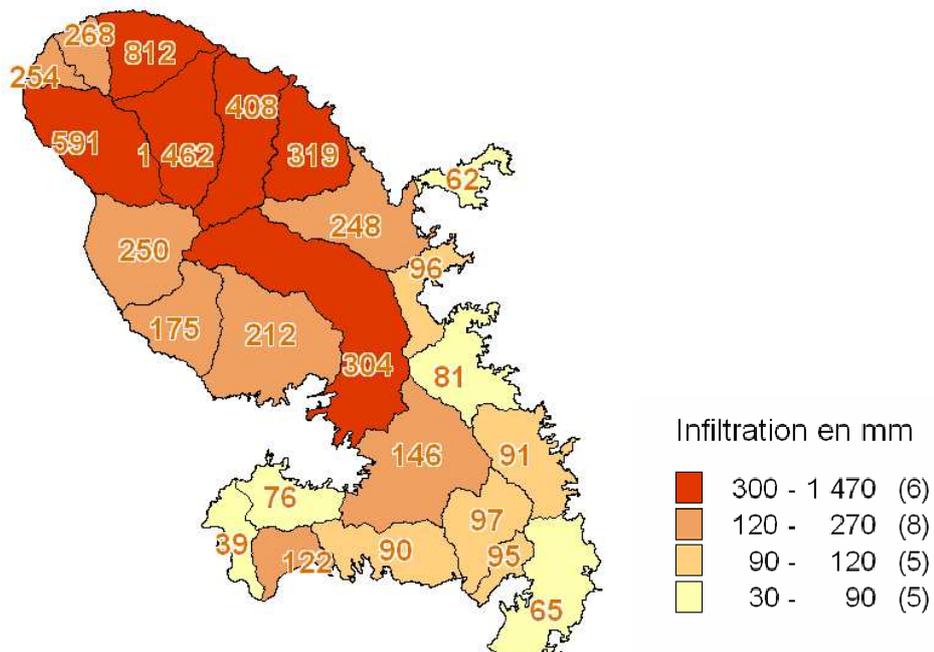


Illustration 67 : Variabilité spatiale de l'infiltration, par unité régionale

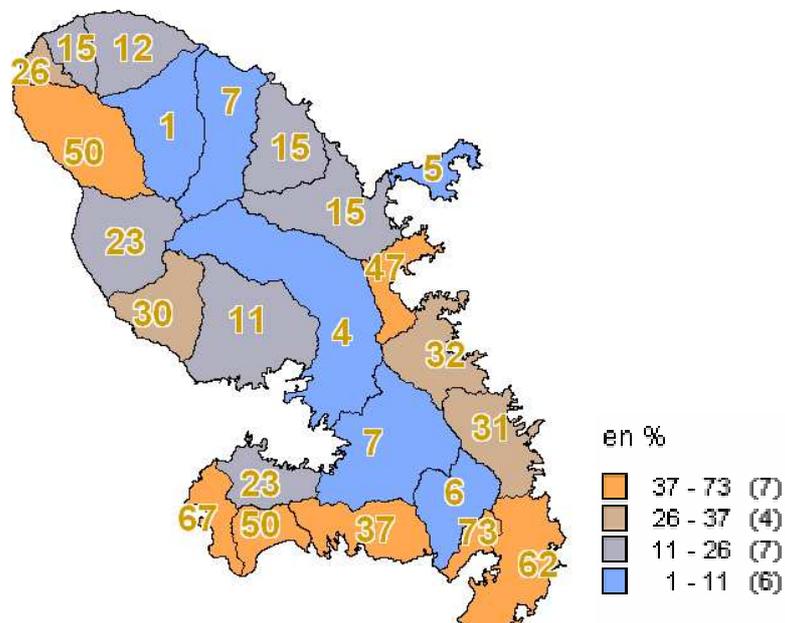


Illustration 68 : Pourcentage de l'eau infiltrée s'écoulant directement en mer

4.5.2.2. SYNTHESE 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 :

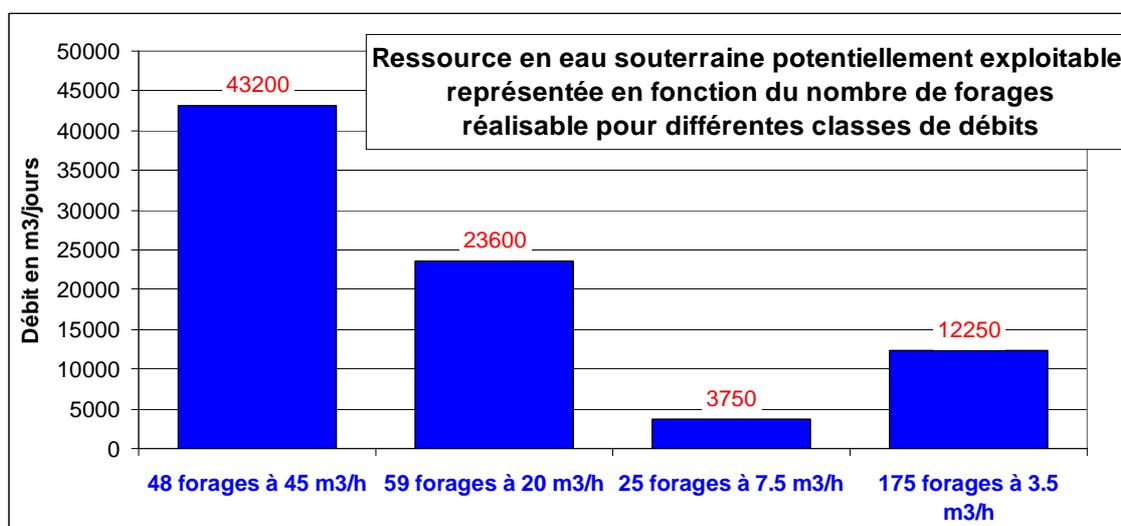


Illustration 69 : Ressource en eau potentiellement exploitable en fonction du nombre de forages

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.**

L'Illustration 70 présente la répartition des volumes que l'on pourrait prélever 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 70 : Répartition des volumes prélevables par les classes de forages de 20 et 45 m³/h, selon les 4 grands secteurs géographiques de l'île

Ce projet a également permis de conceptualiser le « cycle de l'eau » en Martinique dans l'état actuel des connaissances (Illustration 71). Les légères différences avec les valeurs avancées plus haut correspondent notamment aux imprécisions induites par la discrétisation de la Martinique selon un maillage carré.

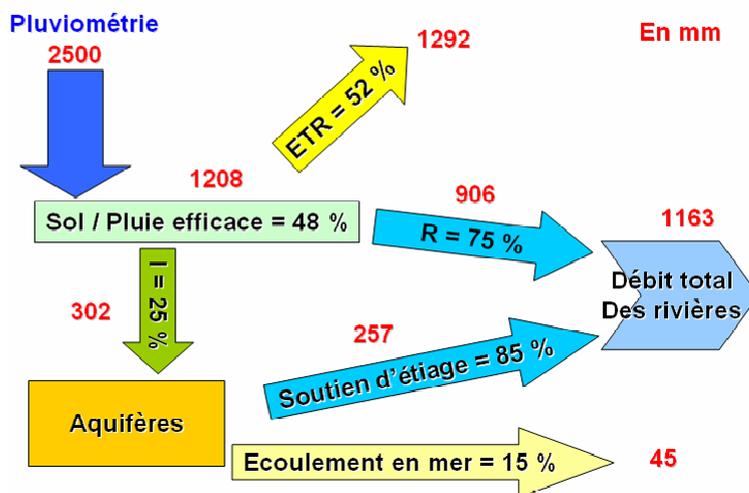


Illustration 71 : Conceptualisation du cycle de l'eau de la Martinique (état actuel)

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.

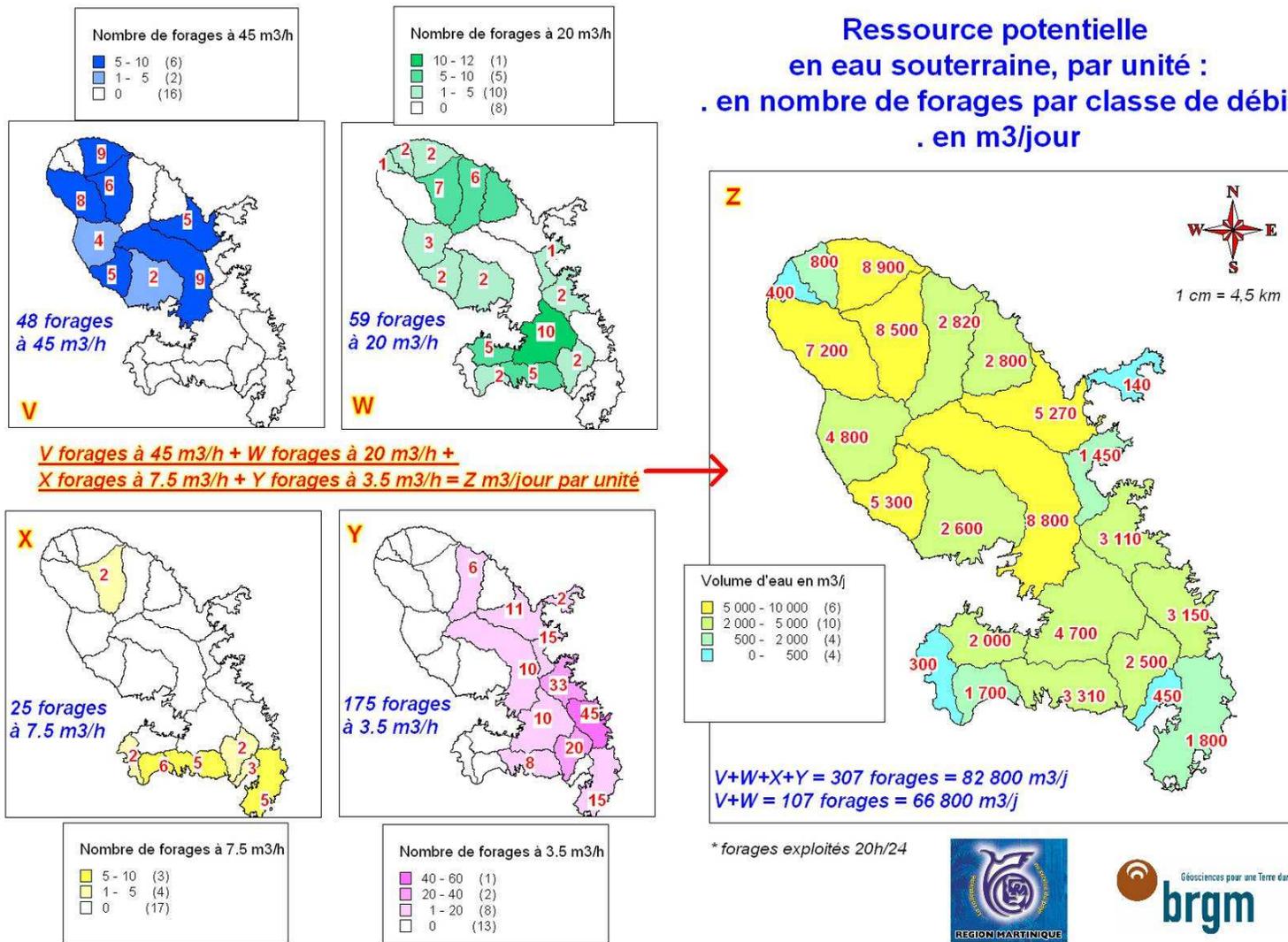


Illustration 72 : Répartition de la ressource en eau souterraine potentiellement exploitable par unité hydrogéologique

4.6. CONCLUSION

Si l'on ne tient pas compte des aspects liés à la qualité, les ressources en eau de la Martinique sont importantes et les eaux souterraines ne sont encore que peu exploitées. La réalisation de forages disséminés sur le territoire permettrait, semble-t-il, de mieux répondre à la demande actuelle. D'après l'étude rapportée ci avant, l'exploitation de tous les forages apporte un volume complémentaire de 30 Mm³/an, lequel ne représenterait que 9% de l'infiltration et 2.3% de la pluie efficace.

Dans ces conditions, même si l'on considère que le changement climatique va induire une élévation de température engendrant une augmentation sensible de l'ETP (de l'ordre de 10% pour une élévation de température moyenne de +2°C, hors variation liée à l'altitude) le volume infiltré demeurerait très largement supérieur aux prélèvements.

Il est toutefois probable que cet impact serait plus prononcé sur le Sud et la cote sous le vent.

L'impact du changement climatique serait probablement plus marqué dans le sud de l'île et sur la côte sous le vent. Par ailleurs il contribuerait à accentuer les inadéquations besoins/ressources locales nécessitant le transfert de plus gros volumes depuis le nord vers le sud. Dans ces conditions, une répartition géographiquement plus homogène de nouveaux forages serait à l'évidence un moyen d'éviter les disparités géographiques en termes d'approvisionnement.

Au niveau des aquifères littoraux, les remontées du niveau marin ainsi que la pression sur les prélèvements d'eau souterraines contribueront à la progression du biseau salé à l'intérieur des terres progression que pourrait endiguer une gestion active de la ressource.

5. LA REUNION

5.1. CONTEXTE

5.1.1. GENERALITES

L'île de la Réunion est située dans le Sud-Ouest de l'océan Indien, entre Madagascar, à 700 km à l'Ouest, et Maurice, à 180 km au Nord-Est. Son centre géographique, de coordonnées 21.06 de latitude sud et 55.32 de longitude est la place dans l'hémisphère Sud, à 300 kilomètres environ au Nord du tropique du Capricorne. Posée sur un plancher océanique profond de 4 000 m entre le fossé des Mascareignes au Nord-Ouest et le fossé de Madagascar -Maurice au Sud-Est, elle appartient, au plan géostructural, à la plaque africaine limitée à 800 km à l'Est par le point triple de Rodrigues, jonction des plaques africaine, indo-australienne et antarctique

De forme elliptique selon un grand axe Nord-Ouest-Sud-Est long de 70 km, et un petit axe Nord-Est-Sud-Ouest long de 50 km, elle a une superficie de 2 512 km² pour un périmètre de 208 km et elle culmine à 3 069 m. Générée par un point chaud, elle résulte de l'empilement de formations volcaniques qui ont commencé à émerger il y a environ 3 millions d'années, constituant d'abord le massif du Piton des Neiges qui a fonctionné jusqu'à, il y a 10 000 ans, puis, accolé à celui-ci au Sud-Est, le massif de la Fournaise, né il y a plus de 500 000 ans et encore en activité (fig. 2). Autour des sommets de ces deux massifs, les flancs des deux cônes volcaniques ou pentes externes présentent une faible inclinaison de 7 à 10 %, profondément entaillée par un réseau hydrographique dense, dont les ravines principales engendrent des encaissements linéaires de plusieurs centaines de mètres de profondeur. Sur le massif du Piton des Neiges, celles-ci drainent trois vastes dépressions sub-circulaires appelées cirques (Mafate, Salazie et Cilaos), limitées par des falaises abruptes de 1 000 m de dénivelée et d'origine tectono-érosive. Sur le massif du Piton de la Fournaise, les trois rivières principales, d'origine tectonique, sont alignées sur des limites de caldeiras.

Les besoins actuels en eau pour l'ensemble de l'île, non compris l'hydroélectricité (550 Mm³ par an), sont estimés de l'ordre de 570 Mm³, soit 18 m³/s, répartis en 420 Mm³ pour l'agriculture et 150

pour les besoins domestiques et industriels. La ressource potentielle est quant à elle estimée à plus de 5 000 Mm³, soit de l'ordre de 160 m³/s répartis en 70 m³/s pour l'eau de surface et 90 m³/s pour l'eau souterraine. Autrement dit, le potentiel d'alimentation global de l'île est plus de 8 fois supérieur aux besoins actuels, et pourtant, de graves problèmes d'alimentation en eau existent du fait d'une répartition très inégale de la ressource, dans l'espace et dans le temps, et d'une relative inadéquation entre la localisation de la ressource et les lieux de consommation.

Globalement, les ressources en eau de la Réunion sont très importantes et de bonne qualité, et suffisantes aux besoins de l'île. Cependant, elles sont mal réparties géographiquement, ce qui peut entraîner localement des conflits d'usage, et les complémentarités entre ressources superficielles et ressources souterraines ne sont pas suffisamment valorisées pour sécuriser l'approvisionnement.

En ce qui concerne les eaux souterraines, il a été défini 12 nappes stratégiques qui correspondent à des aquifères fortement sollicités ou des nappes à faible pression d'usage et à forte potentialité (fig. 19) :

- nappe de la ravine Saint-Gilles,
- nappe de Saint-Denis,
- nappe de la rivière du Mât,
- nappe de la plaine des Palmistes,
- nappe de la côte ouest,
- nappe de la rivière des Remparts,
- nappes de la rive droite de la rivière des Galets,
- nappe de la Plaine de Saint-Paul,
- nappe de la Plaine du Gol,
- nappe de Pierrefonds,
- nappe de la Rivière de l'Est,

- nappes du domaine aquifère du massif de la Fournaise

5.1.2. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES

Le climat tropical de La Réunion est caractérisé par une saison fraîche et sèche de mai à octobre et une saison chaude et humide (saison cyclonique) de novembre à avril. La répartition des précipitations est inégale sur l'ensemble du territoire (Illustration 73) avec localement de forts gradients pluviométriques (600 à 9000 mm/an). La partie est (côte au vent) est soumise aux alizés et reçoit plus de 70 % des précipitations, alors que la partie ouest (côte sous le vent) souffre d'un manque d'eau lors de la saison sèche.

La Réunion doit son climat contrasté à : i) sa situation géographique, sa latitude australe assez basse, ii) à la compacité de son orographie et iii) son altitude élevée.

Les deux traits dominants sont, d'une part, un régime régulier d'alizés (vents d'est dominants) créant une zone « au vent » et une zone « sous le vent » ; d'autre part, un régime de perturbations tropicales parfois violent et destructeur (cyclones) plus irrégulier et difficilement prévisibles.

Les types de climat dépendent essentiellement de la position de l'anticyclone semi-permanent de l'océan Indien et des fluctuations du champ barométrique méridional provoquées par son évolution. La Zone de Convergence Intertropicale (Z.C.I.T), région de conflit des masses d'air tropical issues des deux hémisphères, est une zone de basses pressions qui se trouve au nord de l'anticyclone. Ces différences de pression provoquent des perturbations tropicales sur la face Sud de la Z.C.I.T. Au sud de l'anticyclone se situe une zone dépressionnaire où circulent des perturbations d'origine polaire.

Durant la période cyclonique, l'anticyclone est dans sa position la plus méridionale et la Z.C.I.T se trouve dans l'hémisphère sud. Pendant la saison fraîche, l'anticyclone remonte vers le nord en même temps que la Z.C.I.T et des perturbations polaires atténuées peuvent toucher l'île.

5.1.3. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES

La géométrie du réseau hydrographique est caractéristique de celui d'une île volcanique récente en zone tropicale humide, où la topographie est souvent proche des formes structurales initiales. La

disposition conique des pentes implique une divergence des ravines autour des deux centres de rayonnement que constituent le piton des Neiges et la Fournaise.

Le réseau hydrographique, composé de très nombreuses mais courtes ravines, draine les eaux vers la sortie des cirques et les concentre dans trois rivières pérennes : Rivière des Galets (dans le cirque de Mafate), Bras de Cilaos (dans le cirque de Cilaos) et Rivière du Mât (dans le cirque de Salazie). Sur les 750 rivières et ravines recensées dans toute l'île, une vingtaine seulement ont un écoulement permanent tout au long de l'année (Illustration 74)

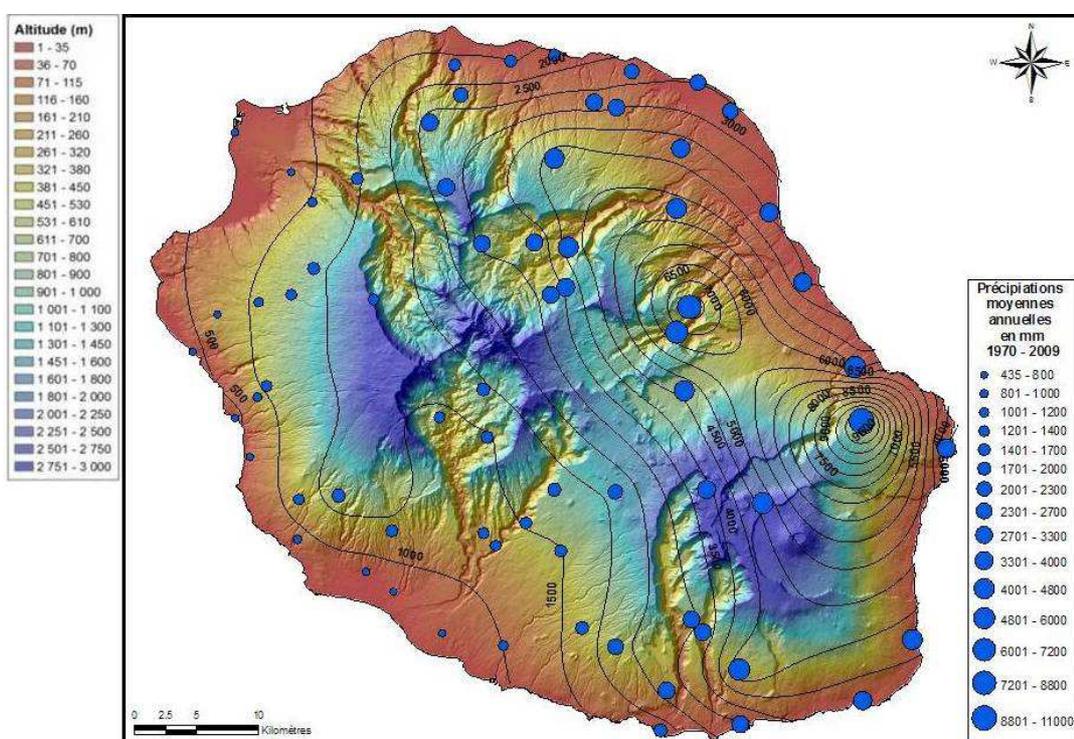


Illustration 73 : Topographie de l'île de la Réunion (MNT 25 m) et répartition moyenne annuelle des précipitations (tracé des isohyètes de Météo France 1970-2009 et localisation des postes pluviométriques utilisés pour le tracé des isohyètes)

récent, le Piton de la Fournaise, est apparu sur le flanc Sud-est du Piton des Neiges, il y a 350 000 ans, et reste actif à l'heure actuelle (une éruption tous les 12 mois en moyenne).

Ces deux volcans sont formés d'un empilement en « sandwich » de plusieurs milliers de mètres d'épaisseur, constitué d'une alternance « laves-scories », compartimenté par des dykes (injection de magma), et dont le pendage moyen est de 5 à 18° vers la mer (sauf entre les 2 volcans où les laves des deux appareils s'interpénètrent).

L'intérieur des cirques est partiellement occupé par d'épaisses séries détritiques posées sur le socle volcanique généralement hydrothermalisé et imperméable. Ces brèches plus ou moins consolidées sont le résultat de l'effondrement des flancs du volcan par panneaux entiers, mis en mouvement le long des plans de glissement que constituent les dykes. Les matériaux sont évacués vers les zones côtières où trois puissantes plaines alluviales s'étalent au débouché des cirques (Illustration 75).

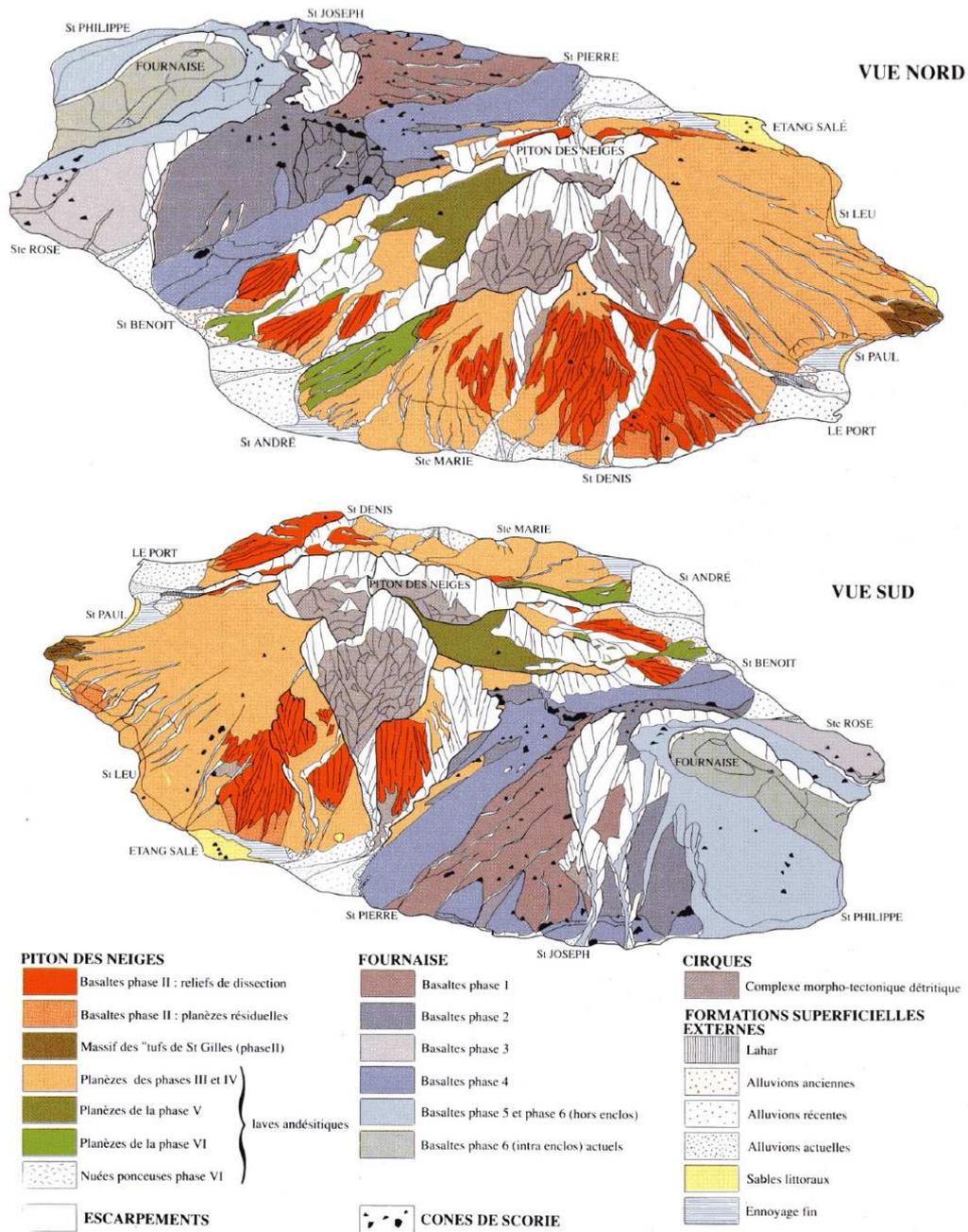


Illustration 75 : Perspectives morpho-géologiques schématiques (Raunet, 1991)

5.1.5. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES

Du point de vue hydrogéologique, deux principales zones sont distinguées sur l'île (Join, 1991) :

1. un « domaine littoral », caractérisé par un « complexe aquifère de base » qui contient la « nappe de base » en équilibre avec les intrusions salines. Ce domaine est assez bien connu grâce aux forages ;
2. un « domaine d'altitude » contenant des nappes perchées et la « nappe de base ». Ce domaine est surtout connu grâce aux sources qui en émergent.

5.1.5.1. HYDROGEOLOGIE DU DOMAINE LITTORAL

Le littoral réunionnais est constitué (Coudray, 2003) :

- de falaises entaillant les planèzes formées par l'empilement de coulées de lave volcanique et de scories ;
- de plaines littorales constituées de dépôts détritiques alluviaux et parfois marins.

Le complexe aquifère de base s'étend de façon plus ou moins continue au sein de différentes formations géologiques. Ces nappes sont caractérisées par des gradients piézométriques faibles (entre 0,2 et 3,2 %), des zones d'émergences en mer et un équilibre hydrodynamique avec les eaux salées. La continuité de ces nappes vers l'intérieur de l'île est fortement soupçonnée.

Les complexes fluvio-deltaïques construits à l'embouchure des principales rivières (rivière du Mât, rivière de l'Est) renferment une ou plusieurs nappes superposées (les plus profondes étant captives). Cette mise en captivité des nappes par des niveaux détritiques ou volcaniques imperméables ainsi que les apports d'eau provenant de l'amont permettent de limiter les phénomènes de contamination marine.

Les eaux de la nappe de base sont moyennement à faiblement minéralisées (conductivité électrique comprise entre 50 et 1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et de faciès hydrogénocarbonaté calcique ou magnésien.

5.1.5.2. HYDROGEOLOGIE DU DOMAINE D'ALTITUDE

Steenhoudt (1983) a synthétisé le comportement hydraulique de différentes formations. Les zones d'infiltration sont localisées dans :

- les coulées fissurées et scories non altérées en surface structural et fond de ravine,
- les formations détritiques à sol peu évolué.

Les régions peu perméables discontinues à l'origine de petites nappes perchées se situent au niveau :

- des coulées massives,
- des sills et dykes massifs,
- des coulées boueuses,
- des formations argilisées,
- des pyroclastiques à matrice cendreuse.

Les horizons imperméables généralisées ou régionaux sont :

- les formations affectées par le phénomène de « self-sealing » (zéolitisation des premières phases du piton de la fournaise),
- les paléosols d'interphase à évolution argilo-latéritique avancée (entre phase II et III),
- les tufs.

Les réservoirs aquifères se trouvent dans :

- les coulées fissurées et scories,
- les alluvions propres.

Les principaux axes de drainage sont :

- le paléoréseau hydrographique,

- les tunnels de laves,
- le long des intrusions (dykes fissurés).

5.1.5.3. CIRCULATIONS SOUTERRAINES PARTICULIERES

La configuration géologique de l'île induit des circulations souterraines très particulières (Atlas hydrogéologique de la Réunion) :

- infiltration en surface sur des terrains volcaniques généralement très perméables,
- interception des écoulements par une formation géologique locale imperméable ou semi-perméable (coulée massive, intrusion de lave-sill et dyke, coulée boueuse, niveau argilisé, pyroclastites matrice cendreuse),
- constitution d'une nappe perchée portée par cette formation imperméable et circulation rapide de l'eau au toit de celle-ci (forte perméabilité des scories récentes, tunnels de laves, fracturation, paléo vallées,...),
- résurgence possible des eaux par déversement à la faveur de la topographie (rempart, amphithéâtre et tête de ravine) et alimentation d'une source,
- alimentation en cascade de nappes perchées dans les strates inférieures en limite d'extension de l'imperméable ou sur une discontinuité,
- retour à l'océan des eaux souterraines en zone littorale à travers le complexe aquifère de base.

5.1.5.4. INFLUENCE DE LA MER

La géométrie de l'intrusion saline est définie par le contact eau salée-eau douce. La qualité des eaux de l'aquifère est liée en partie à l'alimentation de la nappe qui repousse plus ou moins l'invasion d'eau saumâtre dans les terrains. Dans un aquifère composé de plusieurs nappes superposées, il peut exister sur une même verticale des réservoirs captifs d'eau douce sous des horizons saturés en eau saumâtre.

5.1.5.5. NAPPES STRATEGIQUES

Le SDAGE de La Réunion a défini neuf aquifères abritant des ressources stratégiques (*Illustration 76*). Elles présentent des caractéristiques remarquables : par exemple aquifères fortement sollicités, nappes à faible pression d'usage et à forte potentialité, etc...

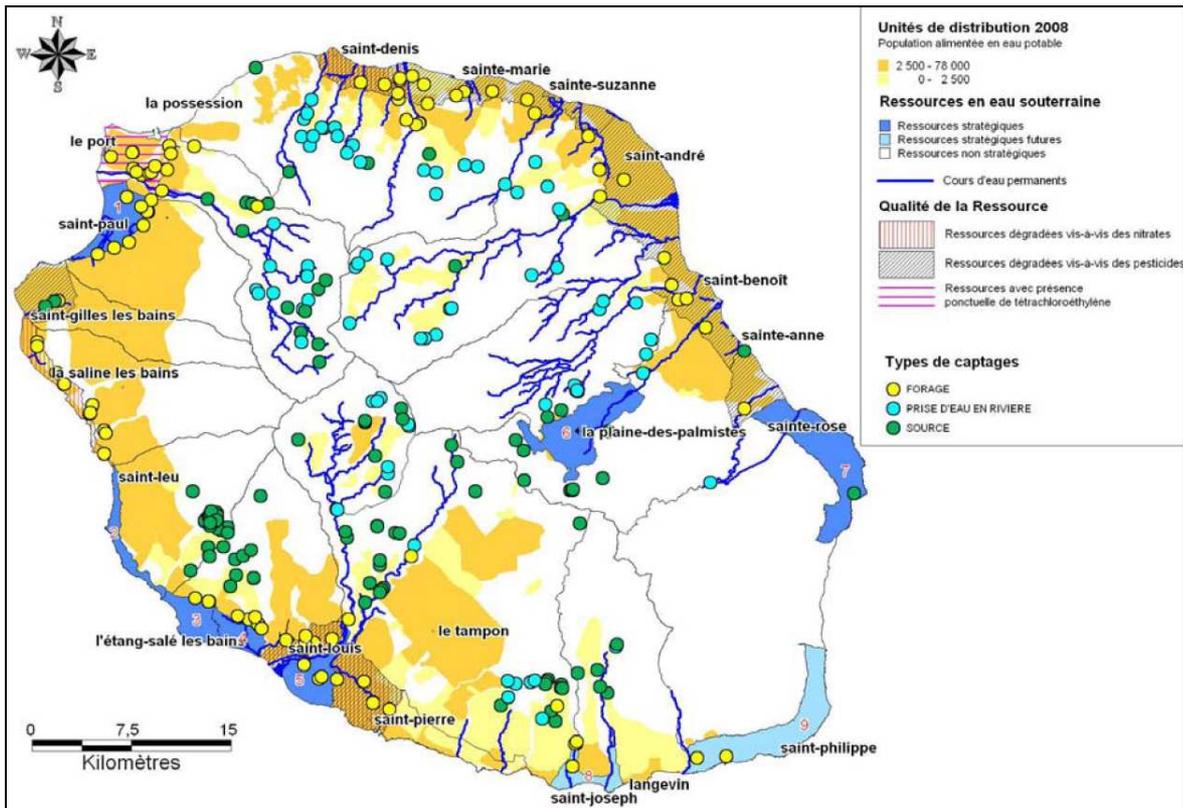


Illustration 76 : Carte de localisation des nappes stratégiques

5.2. CALCUL DE LA PLUIE EFFICACE

5.2.1. PRINCIPE DU CALCUL : MODELE DE THORNTHWAITE

La pluie efficace et l'ETR sont estimées au pas de temps journalier à partir d'un bilan hydrologique du sol selon le modèle de Thornthwaite (*Illustration 77*).

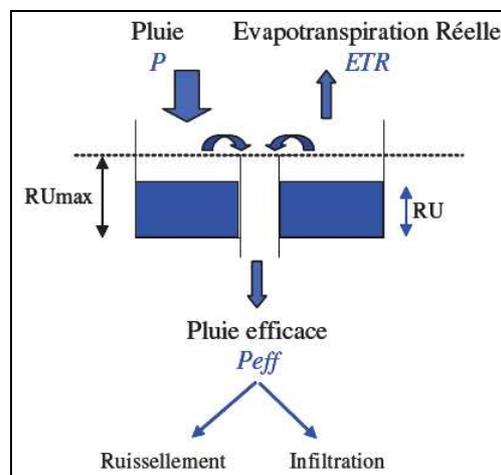


Illustration 77 : Modèle de Thornthwaite (1948)

Dans ce modèle, l'ETR est toujours inférieure ou égale à l'ETP. 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 $P - ETR$.

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

$$ETR_n = \min (ETP_n ; P_n + RU_n)$$

$$P_{effn} = P_n - ETR_n + RU_n - RU_{max}$$

$$\text{Si } P_{effn} \leq 0 \text{ alors } P_{effn} = 0$$

$$RU_{n+1} = \min (RU_{\max} ; P_n + RU_n - ETR_n)$$

5.2.2. DESCRIPTION DE LA METHODE UTILISEE DANS L'ETUDE

Pour évaluer la distribution spatiale de la pluie efficace sur l'ensemble de l'île, La Réunion a été découpée en 2052 mailles de 1 km². A chacune de ces mailles a été affectées des chroniques de pluie et d'ETP, au pas de temps journalier sur la période du 01/01/2001 au 31/12/2010 et une valeur de réserve utile. Lorsque les valeurs de réserve utile n'étaient pas disponibles, le calcul n'a pas été effectué. Les paragraphes suivants détaillent la détermination des valeurs par maille de pluie, ETP et RU nécessaire au calcul.

5.2.3. PLUVIOMETRIE

5.2.3.1. PRESENTATION

La Réunion présente des régimes de pluies contrastés avec des totaux pluviométriques variables dans l'espace et dans le temps.

Le bilan annuel réalisé par Météo France Réunion se base sur des études statistiques réalisées à partir de 70 stations pluviométriques réparties sur l'ensemble de l'île pour une période de 30 ans, période de référence que préconise l'Organisation Mondiale de la Météorologie.

La carte des isohyètes annuelles montre que les hauts reliefs de l'île (massifs du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise) causent une dissymétrie entre l'est (côte au vent) et l'ouest (la côte sous le vent). La limite entre les régions « au vent » et « sous le vent » coïncide à peu près avec l'isohyète moyenne annuelle de 2000 mm.

La côte au vent est directement soumise aux alizés et la pluviométrie y est importante toute l'année. La côte sous le vent est protégée de ces vents par les reliefs et le climat est ainsi beaucoup moins humide.

A l'Ouest, il pleut de 1 à 3 m par an en moyenne. La région la plus sèche de l'île est le littoral ouest compris entre la Possession et Saint-Pierre, avec moins de 1000 mm/an. Le Port et Saint-Gilles ne totalisent que 500 mm/an de précipitations (un minimum de 435 mm/an autour de la Pointe des Trois Bassins). Le maximum pluviométrique de la partie ouest s'observe autour à la Plaine des

Makes (1762 mm).

A l'Est, la moyenne annuelle des précipitations est comprise entre 3000 et 10000 mm. Les précipitations les plus intenses se situent aux altitudes intermédiaires, entre 1000 et 2000 mètres (Takamaka, Hauts de Sainte-Rose et Forêt de Saint-Philippe). Il y a deux maximaux nets : 6 m à l'amont de la rivière des Marsouins et 9 m dans les Hauts de Sainte-Rose. Dans certaines régions à l'Est, la pluie est donc abondante et atteint même des records mondiaux. Les deux zones les plus arrosées sont : la région de Takamaka avec en moyenne 7 m/an (11 693 mm enregistré en 1959) et celle du volcan (tout le Sud-Est) avec plus de 11 m/an sur les Hauts de Sainte-Rose (15 m enregistré en 1982).

Il est à noter que les précipitations commencent par augmenter en fonction de l'altitude, passent par un maximum puis décroissent. Le seuil maximum se trouve entre les altitudes 1400 et 1500 mètres sur les planèzes occidentales de l'île et autour de 1600 mètres sur les versants est.

A la Réunion, on distingue deux saisons :

- la saison des pluies, de décembre à avril,
- la saison sèche, de mai à novembre.

Pendant la saison sèche, les températures sont douces et les pluies peu abondantes. Sur la côte ouest, la pluviométrie des mois de juillet à octobre est très faible voire quasi nulle (moins de 100 mm mensuels). A l'est, la pluviométrie reste tout de même importante et varie entre 100 mm à 300 mm par mois, notamment au niveau du volcan où la moyenne du mois le plus sec atteint 700 mm environ.

L'augmentation des précipitations pendant la saison des pluies est importante : à l'ouest, la pluviométrie moyenne mensuelle se situe entre au moins 100 mm et 300 mm (sauf sur le littoral). Les températures sont plus élevées.

Le mois de février est le mois le plus arrosé sur l'ensemble de l'île (1 500 mm sur la station des hauts de Saint-Rose).

5.2.3.2. ZONAGE PLUVIOMETRIQUE

Météo France Réunion a réalisé deux cartes de zonage pluviométrique en 1997 et en 2010. La carte

de 2010 (description ci-dessous et *Illustration 78*) tient compte du relief contrairement à celle de 1997.

A l'ouest, la bande littorale qui s'étend de Saint-Denis à Grands Bois (région 1) est la région la plus sèche de l'île toute l'année. Les précipitations s'y produisent essentiellement en saison des pluies et sont d'autre part très tributaires des événements cycloniques qui n'interviennent pas forcément tous les ans.

La région 2 regroupant les hauts de l'Ouest, les cirques de Mafate et de Cilaos, et la Plaine-des-Cafres est très sèche de mai à octobre, mais elle bénéficie de précipitations nettement plus abondantes en saison des pluies.

A l'est, les distinctions sont plus nombreuses. A la périphérie de l'île, la région de Sainte-Rose (région 7) est de loin la plus arrosée. Les précipitations y sont abondantes toute l'année et il y pleut souvent plus en hiver qu'en été.

Dans la région nord-est, allant de Sainte-Marie à Saint-Benoît (région 5), et la région Sud, aux alentours de Saint-Joseph (région 6), les quantités annuelles sont moindres, mais la sécheresse hivernale reste peu marquée.

Les variations sont beaucoup plus significatives sur les régions centrales comprenant les hauts du nord et le cirque de Salazie (région 3) et surtout la Plaine-des-Palmistes et l'est du volcan (région 4) où février est jusqu'à 10 fois plus arrosé que le mois d'octobre.

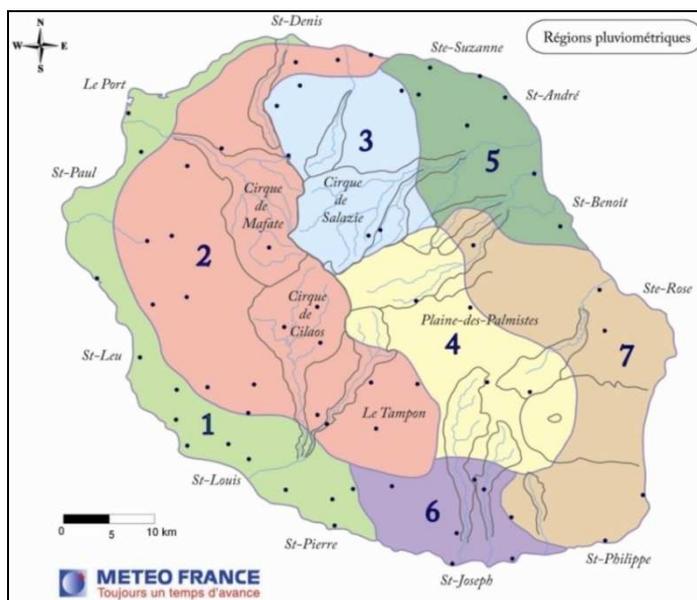


Illustration 78 : Régions pluviométriques déterminées par Météo-France Réunion (2010)

5.2.3.3. LES STATIONS PLUVIOMETRIQUES SELECTIONNEES POUR L'ETUDE

Suite à cette analyse de la pluviométrie, 23 postes pluviométriques ont été sélectionnés parmi les postes actuellement en service en fonction des critères suivants :

- répartition sur les isohyètes annuelles calculées sur la période 1970-2009,
- appartenance aux différentes régions pluviométriques homogènes délimitées par Météo-France Réunion (de 1997 et 2010).

Les données météorologiques ont été collectées au pas de temps journalier de 2001 à 2010 pour ces 23 stations réparties sur l'ensemble de l'île. Les lacunes dans les données acquises ont été comblées à l'aide de corrélations intersections.

5.2.3.4. DISTRIBUTION SPATIALE DE LA PLUVIOMETRIE

Les zones d'influence des 24 postes sélectionnés ont été déterminées par les polygones de Thiessen (Illustration 79). Cette méthode consiste à définir des zones pour lesquelles chacun des points situés à l'intérieur soit plus proche en distance horizontale du pluviomètre considéré. Ceci permet en fait de garder la répartition temporelle des précipitations. En effet, deux postes pluviométriques localisés à

l'intérieur des deux mêmes isohyètes peuvent avoir une distribution temporelle différente.

Ces zones d'influence ont ensuite été redécoupées en fonction des isohyètes moyennes annuelles calculées sur la période 1970-2009 en définissant deux coefficients de pondération : un minimal et un maximal correspondant aux valeurs des isohyètes minimale et maximale calculés sur la période 1970-2009 selon le principe suivant :

$$Pluie\ maillemin(t) = Pluie\ poste\ référence(t) \times \frac{Isohyète\ min}{moyenne\ poste\ référence}$$

$$Pluie\ maillemax(t) = Pluie\ poste\ référence(t) \times \frac{Isohyète\ max}{moyenne\ poste\ référence}$$

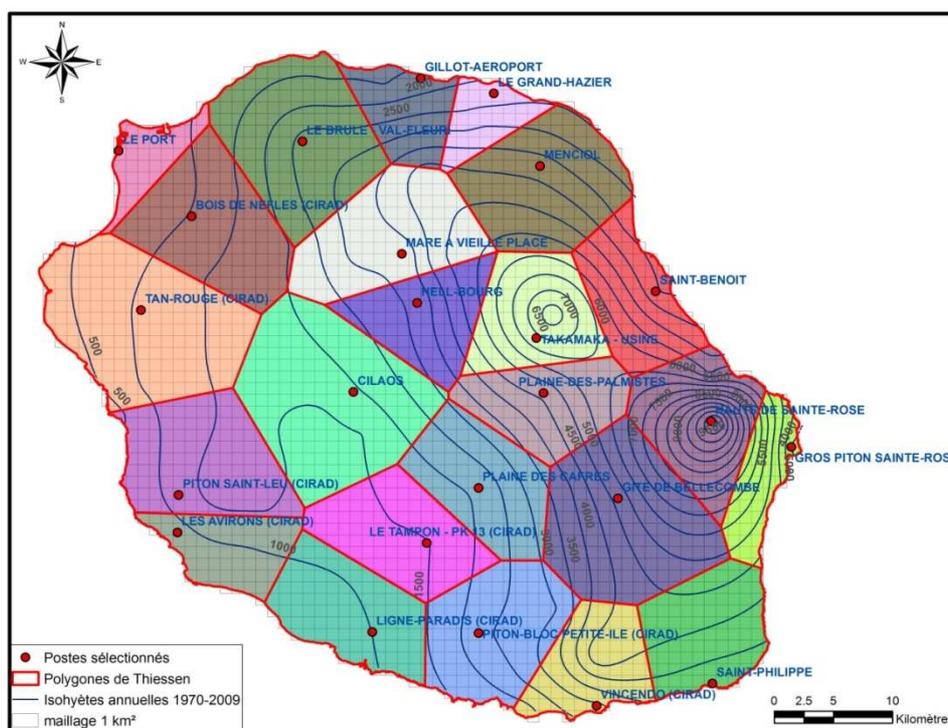


Illustration 79 : Principe de distribution spatiale de la pluie en fonction des polygones de Thiessen et des isohyètes annuelles

Chaque maille de 1 km² possède donc un poste pluviométrique de référence et deux coefficients de pondération.

5.2.4. EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

5.2.4.1. TEMPERATURE

a) Corrélation avec l'altitude

La position géographique de l'île, le rôle régulateur de l'océan et des alizés, sont les principales causes de la douceur des températures à la Réunion. L'amplitude diurne et annuelle des températures est très faible : de 5 à 7°C environ. Le cycle annuel des températures est caractérisé par les deux saisons (atlas climatique de la Réunion 1997).

Au cours de la saison fraîche, de mai à octobre, les températures varient :

- sur le littoral, de 17°C à 20°C pour les minima moyens et de 26°C à 28°C pour les maxima moyens,
- à 1000 m d'altitude, de 8°C à 10°C pour les minima moyens et de 17°C à 21°C pour les maxima moyens.

Au cours de la saison des pluies, de novembre à avril, les températures varient :

- sur le littoral, de 21°C et 24°C pour les minima moyens et de 28°C à 31°C pour les maxima moyens,
- à 1000 m, de 10°C à 14°C pour les minima moyens, et de 21°C à 24°C pour les maxima moyens.

De même que pour la pluviométrie, un contraste apparaît entre les plaines littorales et les Hauts ainsi qu'entre les régions au vent et sous le vent. A altitude égale, la moyenne annuelle est plus élevée de 1 à 2 degrés à l'ouest. Les températures décroissent avec l'altitude. En atmosphère libre le [gradient thermique](#) vertical est d'environ -0,6°C pour 100 m. Le long des pentes de l'île, ce gradient est un peu plus marqué variant de -0,7 à -0,8°C pour 100 m. Comme le relief est très accentué sur l'île, les isothermes suivent le plus souvent la carte hypsométrique (Météo-France Réunion).

b) Zonage thermométrique

Météo France a utilisé la méthode de la classification ascendante pour déterminer les zones thermiques homogènes. C'est une méthode statistique basé sur l'agglomération de classes

d'éléments les plus proches selon un critère d'agrégation (critère de Ward).

Météo France a défini sept zones principales ainsi que des stations de référence représentatives de ces zones (*Illustration 80*). Tous les calculs de moyenne sont réalisés sur la période de cinq ans comprise entre janvier 1991 et décembre 1996. La période est assez courte mais semble être représentative et suffisante car les résultats s'avèrent identiques lorsqu'une période de trente ans est utilisée. Ceci tient au fait, qu'à l'inverse de ce que l'on observe pour les précipitations, la variabilité interannuelle est faible. C'est à partir des températures minimales et maximales relevées quotidiennement, que sont calculées les températures minimales et maximales moyennes mensuelles.

Ce zonage illustre bien la corrélation entre l'altitude et la température. L'*Illustration 81* indique l'altitude minimale et maximale de ces zones ainsi que la variation annuelle de la moyenne mensuelle des températures pour chaque station de référence.

Les températures les plus froides sont concentrées au niveau des plus hauts sommets : Piton des Neiges, Grand Bénare et Piton de la Fournaise. Il fait en moyenne 4°C sur les sommets et 6°C dans la plaine des Palmistes pendant l'hiver (il n'est pas rare d'avoir la nuit des températures négatives dans « les hauts ») contre respectivement 12° et 14°C durant l'été. En revanche plus on s'approche de la côte, plus ces températures augmentent. C'est sur le littoral Ouest qu'elles sont le plus élevées, descendant rarement en dessous de 18°C au Port et à St-Gilles. L'Est est un peu plus frais que l'Ouest, à cause des alizés qui rafraîchissent la côte au vent (ventilation, nébulosité, précipitations...). En moyenne la différence est de 2°C.

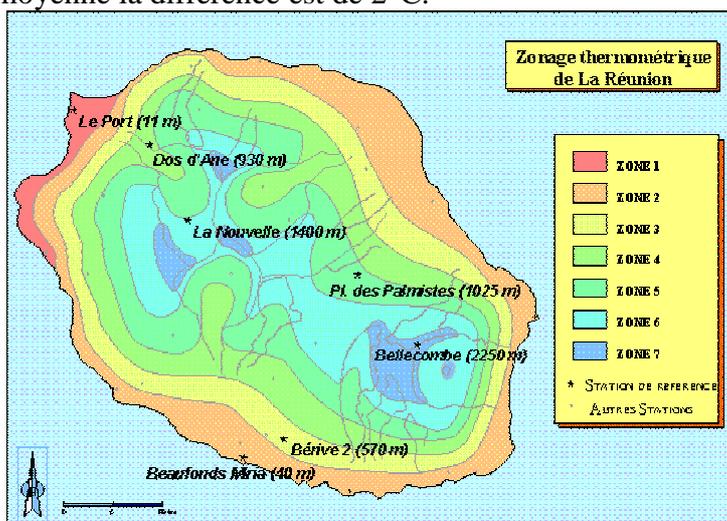


Illustration 80 : Zonage thermométrique définie par Météo France Réunion

Zone	Altitude	Station de référence		
		Station de référence	Altitude	Variation de la température moyenne
1	moins de 50 m	Le Port	11 m	21°C à 29°C
2	entre 50 m et 300 m	Beaufonds Miria	40 m	19°C à 26°C
3	entre 300 m et 600 m	Bérive	570 m	16°C à 24°C
4	entre 600 m et 900 m	Dos d'Ane	930 m	14°C à 29°C
5	entre 900 m et 1350 m	Plaine des Palmistes	1025 m	12°C à 20°C
6	entre 1350 m et 2000 m	La Nouvelle	1400 m	10°C à 18°C
7	Plus de 200 m	Gîte de Bellecombe	2250 m	8°C à 15°C

Illustration 81 : Zonage thermométrique issue de Météo France Réunion

Les températures sont plus homogènes le long des côtes durant toute l'année. Ce phénomène est principalement dû aux brises et à l'océan qui contribuent à équilibrer les températures. La différence de température entre la côte et les hauts est plus faible en été qu'en hiver, saison durant laquelle des températures très froides peuvent être enregistrées sur les sommets.

Mais le phénomène le plus remarquable est la parfaite stabilité géographique de la configuration des différents isothermes au cours de l'année. Si les valeurs de températures évoluent bien sûr, d'une saison à l'autre, les courbes dessinées par celles-ci restent géographiquement semblables. De ce fait, des zones types de température sont aisément identifiables pour l'île de La Réunion (Atlas climatique de la Réunion, Météo France Réunion).

5.2.4.2. EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

a) Postes ETP disponibles

Les « postes ETP » de Météo-France sont presque exclusivement localisés dans l'Ouest de l'île (Illustration 82), sauf la station synoptique de Gillot (situé quasiment en mer).

Sur ces dernières années, les données ETP de Météo-France Réunion ne sont disponibles que sur les postes de Gillot et de la Plaine des Cafres. Les autres données disponibles proviennent de postes tenus par le Cirad. Les chroniques d'ETP du Cirad comportent des lacunes, suite à l'absence des données d'humidité.

Les données disponibles d'ETP ont été calculées à partir de la formule de Penman-Monteith. Une seule station, Gillot Aéroport, possède une longue chronique. Il n'y a pas beaucoup de postes mesurant les paramètres nécessaires au calcul de l'ETP. En outre, les données existantes ne sont pas réparties de manière homogène sur l'ensemble de l'île.

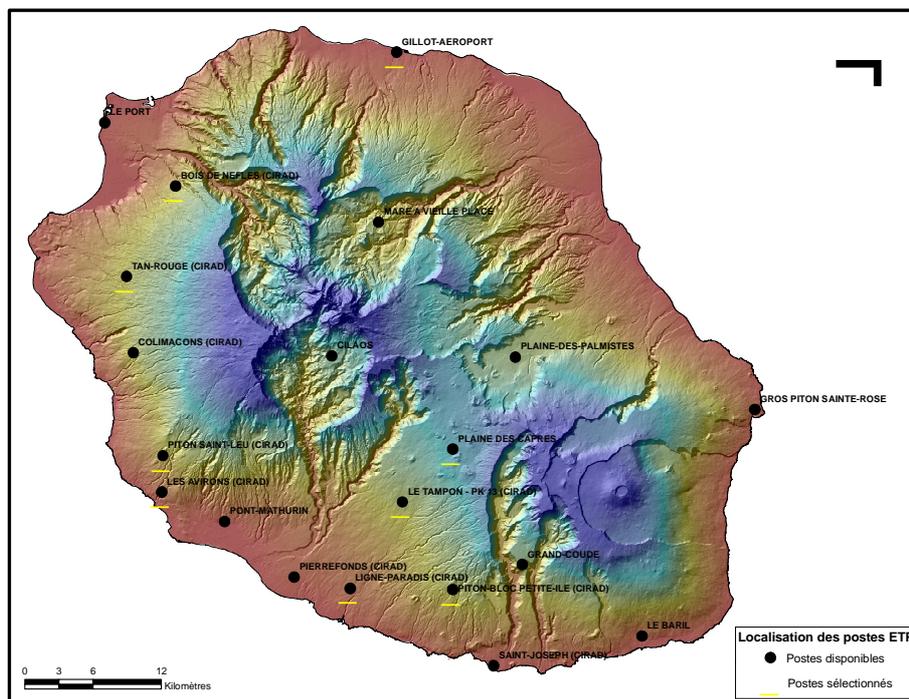


Illustration 82 : Localisation des postes ETP (Météo-France)

N° station	Appellation station	Régression pour déterminer les ETP manquantes
1	LES AVIRONS (CIRAD)	$(0.36 \times ETP_{station8}) + (0.64 \times ETP_{station3})$
2	PITON-BLOC PETITE-ILE (CIRAD)	$(0.68 \times ETP_{station7}) + (0.32 \times ETP_{station8})$
3	PITON SAINT-LEU (CIRAD)	$(0.86 \times ETP_{station1}) + (0.14 \times ETP_{station8})$
4	BOIS DE NEFLES (CIRAD)	$(0.41 \times ETP_{station5}) + (0.59 \times ETP_{station3})$
5	TAN-ROUGE (CIRAD)	$(0.30 \times ETP_{station3}) + (0.70 \times ETP_{station4})$
6	PLAINE DES CAFRES	$(0.37 \times ETP_{station1}) + (0.63 \times ETP_{station8})$
7	LE TAMPON - PK 13 (CIRAD)	$(0.88 \times ETP_{station2}) + (0.12 \times ETP_{station8})$
8	LIGNE-PARADIS (CIRAD)	$(0.47 \times ETP_{station1}) + (0.40 \times ETP_{station11}) + (0.14 \times ETP_{station7})$
9	GILLOT AEROPORT	Série complète

Illustration 83 : Pondération des postes ETP sélectionnés.

b) Corrélation de l'ETP en fonction de l'altitude

Deux principales études (Genere, 1990 et Chopart et al., 2003) ont été réalisées pour estimer la distribution spatiale de l'ETP, établissant une corrélation de l'ETP en fonction de l'altitude. Elles sont présentées ci-dessous.

- ***Genere B. (1990)***

Cette étude est fondée sur un jeu de données de 5 ans sur 6 stations pour les variations saisonnières. Elle propose au pas de temps mensuel sur toute l'île, une relation entre l'altitude et l'ETP Penman.

$$ETP(\text{altitude}) = ETP(0) \times (1 - 4 \times 10^{-3} \times \text{altitude})$$

- ***Etude du CIRAD : Chopard et al. (2003)***

Depuis l'étude précédente, un jeu de données plus complet a permis d'initier une approche plus précise au pas de temps décadaire. Par ailleurs, le calcul de l'ETP se fait maintenant à partir de la formule de Penman-Monteith (Allen et coll., 1998). L'étude du Cirad fournit une estimation de l'ETP0 (évapotranspiration de référence au niveau de la mer) et du gradient de l'ETP en fonction de l'altitude par décade pour chacun des versants est et ouest de l'île.

Comparaison des données ETP et des valeurs estimées par la formule du CIRAD

La formule du CIRAD apporte une bonne approximation de l'ETP au-dessous de 600 m NGR. Au-dessus de 600 m, l'estimation est satisfaisante pour la saison fraîche, mais sous-estime légèrement l'ETP pour la saison chaude.

Distribution spatiale de l'ETP

- Une altitude moyenne est attribuée à chaque maille à partir du MNT à 25 m (illustration 84).
- Un autre paramètre indique si une maille est localisée sur le versant est ou ouest de l'île (illustration 85).

Une valeur d'ETP journalière, identique chaque année, peut ainsi être calculée à partir de la formule du Cirad (Illustration 86).

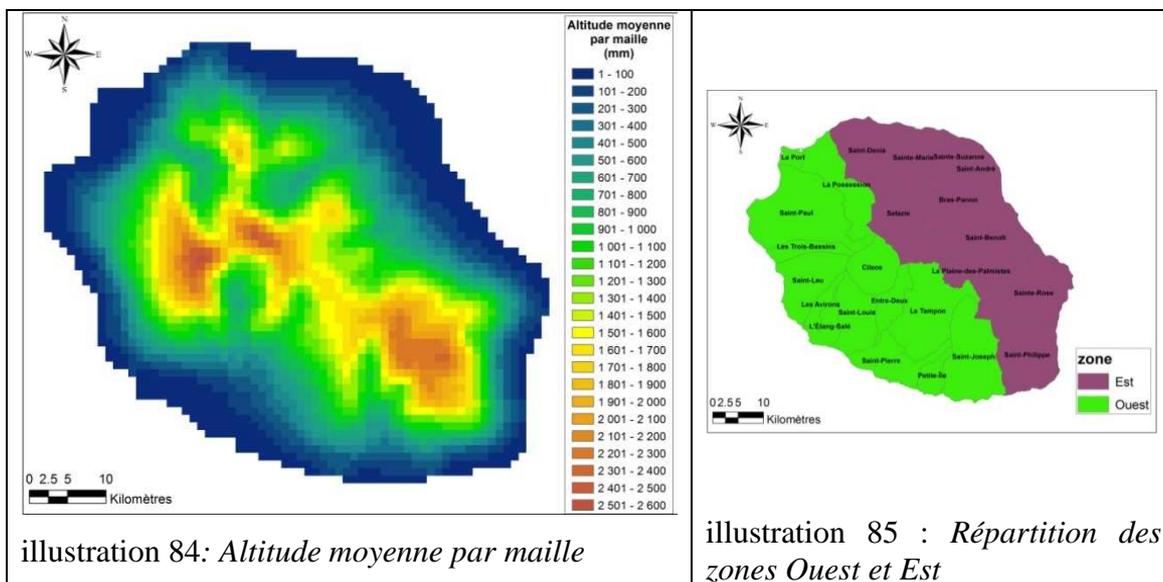


illustration 84: *Altitude moyenne par maille*

illustration 85 : *Répartition des zones Ouest et Est*

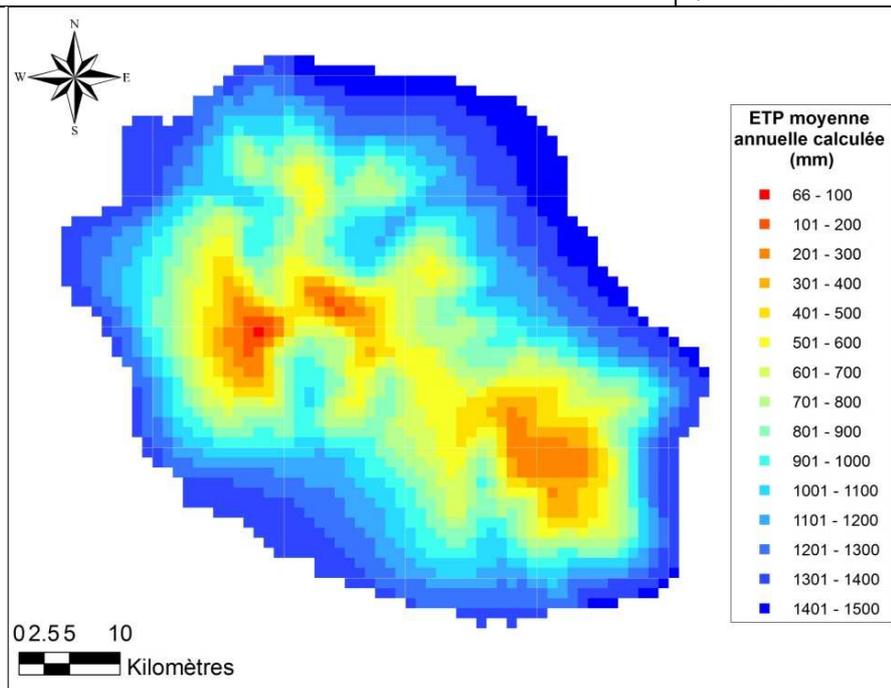


Illustration 86 : Carte des ETP moyennes annuelles calculées par mailles de 1 km²

5.2.5. RESERVE UTILE

Pour les cultures et leur consommation en eau, les agronomes considèrent le sol comme un réservoir présentant un stock d'eau disponible pour la satisfaction des besoins en eaux des plantes. Ils utilisent la notion de "réserve utile".

La réserve utile en eau du sol est définie de la façon suivante :

$$RU = (CR - PF) * Da * Z$$

Où :

- CR est la capacité de rétention qui est la teneur en eau du sol qui reste après alimentation,
- PF est le point de flétrissement permanent, il correspond au seuil au-delà duquel les racines ne peuvent plus extraire l'eau du sol,
- Da est la densité apparente du sol qui permet de convertir les valeurs pondérales en valeurs volumiques.

5.2.5.1. LA CARTE DES SOLS

A la Réunion, les catégories des sols vont du lithosol (roche mère affleurante) au sol très évolué (sol ferralitique) en fonction de son âge, de sa nature et des facteurs climatiques. Les évolutions maximales se rencontrent au niveau des matériaux anciens et sous des conditions climatiques associant des températures élevées et une forte pluviométrie (altitude comprise entre 100 et 1500 m de la côte au vent).

La répartition des sols réunionnais est décrite par Raunet (1991). Les sols les plus anciens de nature ferralitique, se trouvent sur les roches des épisodes volcaniques anciens exposées au vent, à basse et moyenne altitude. Les sols fortement ferralitiques peu tronqués sur volcanisme très ancien (plus de 200 000 ans) sont peu répandus, alors que les sols faiblement et moyennement ferralitiques sur planèzes moins anciennes (75 000 à 200 000 ans) sont plus représentés car ils sont moins touchés par l'érosion.

La zonation des sols est conditionnée par l'existence d'un matelas de cendres (pyroclastites cendrotiffeuses ayant recouvert une majeure partie du massif ancien et du Piton de la Fournaise)

supportant la majorité des andosols de l'île.

A cause du climat et de l'altitude, le versant ouest se différencie très nettement :

- sols bruns andiques entre 350 et 600 mètres
- andosols désaturés non pérhydratés entre 600 et 1 300 mètres
- andosols pérhydratés entre 1 300 et 1 600 mètres
- andosols désaturés podzoliques entre 1 600 et 1 800 mètres
- andosols vitriques ou podzoliques peu épais au-delà de 1 800 mètres.

Sur la côte sous le vent, aux endroits où la couverture de cendres a été éliminée par l'érosion et dans les zones à végétation peu couvrante, de moyenne et basse altitude, on retrouve les : sols bruns, sols bruns vertiques, vertisols, sols lithiques d'érosion.

Les classes de sol et les unités pédologiques homogènes déterminées par Raunet sont représentées sur l'illustration 87.

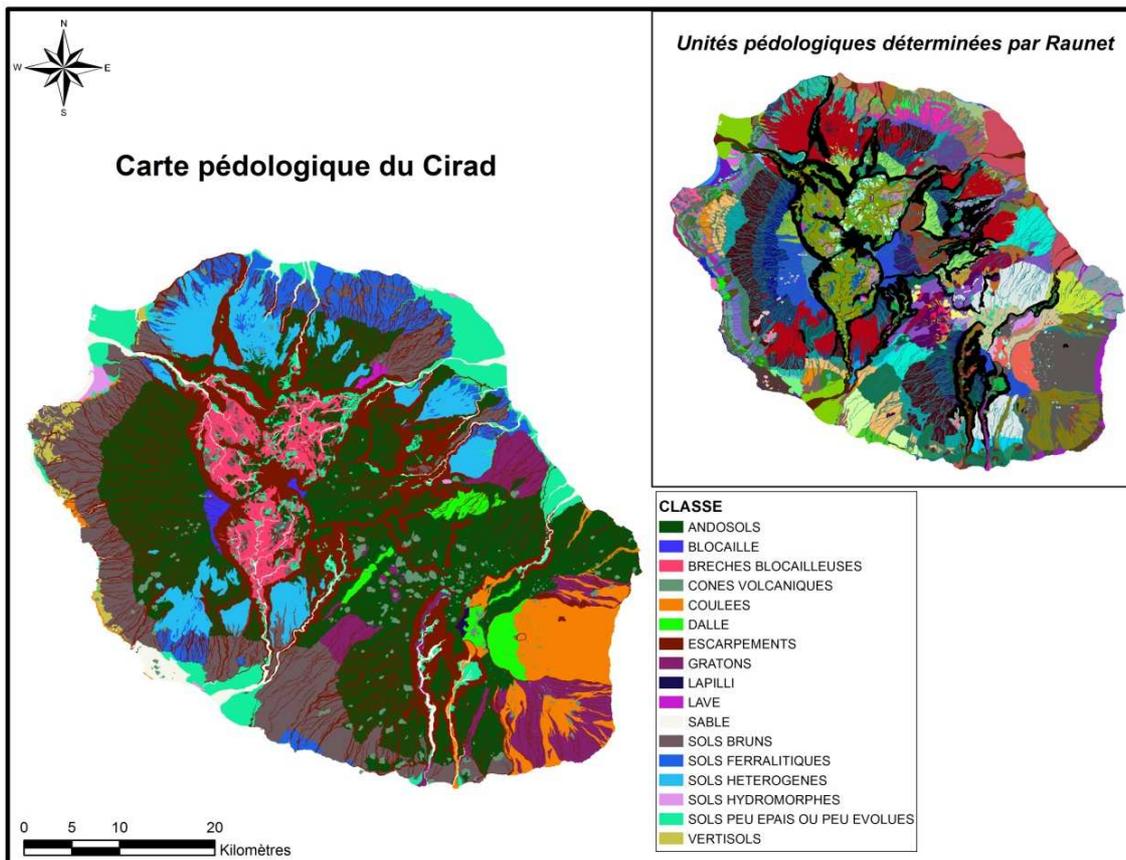


Illustration 87 : Classes de sol issues de la carte pédologique du Cirad

5.2.5.2. CARTE DE LA RESERVE UTILE

Le Cirad a fourni pour cette étude une carte des valeurs de la réserve utile (RU) des sols de la Réunion (Illustration 88 - Carte de la réserve utile du CIRAD

). Ces valeurs ont été calculées à partir de la carte pédologique, des unités pédologiques identifiées (M. Raunet, 1992, CIRAD) et d'expérimentations multilocales. Les valeurs de RU ont été extrapolées sur l'ensemble de l'île jusqu'à l'isoaltitude 1000 mètres en dehors de la région du volcan (D. Pouzet, CIRAD). Les valeurs sont comprises entre 0 et 200 mm (Illustration 88).

Afin de compléter les données manquantes, une analyse et un traitement de cette carte ont été réalisés :

- Une valeur moyenne des réserves utiles a été calculée pour chaque unité pédologique de Raunet ,

- cette valeur a été affectée dans les parties manquantes de la carte des RU, notamment pour celles situées à l'intérieur de l'Ile (au-delà de l'isoaltitude 1000 m).

Les zones étroites d'escarpements ont été supprimées afin d'obtenir un carte lissée et des polygones plus homogènes ; ce traitement est présenté sur Illustration 88 .

La carte résultante reste toutefois incomplète au niveau des cirques de Mafate, Cilaos et d'une partie de Mafate ainsi que pour toute la partie comprenant le volcan de la Fournaise.

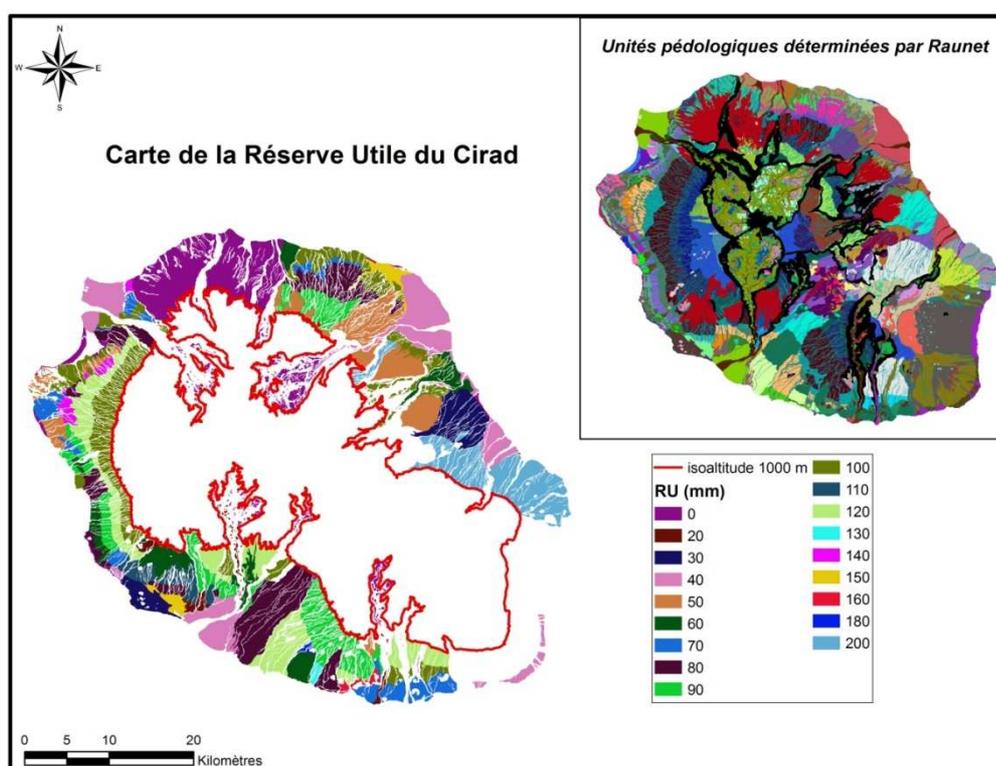


Illustration 88 - Carte de la réserve utile du CIRAD

5.2.5.3. TRAITEMENT DE LA CARTE DE LA RESERVE UTILE

La carte de la réserve utile maximale a été simplifiée : les zones étroites d'escarpements ont été supprimées afin d'obtenir des polygones plus homogènes et de simplifier le calcul de la pluie efficace (Illustration 89 - Carte simplifiée de la réserve utile

). Les valeurs de la réserve utile ont été moyennées sur les mailles de 1 km².

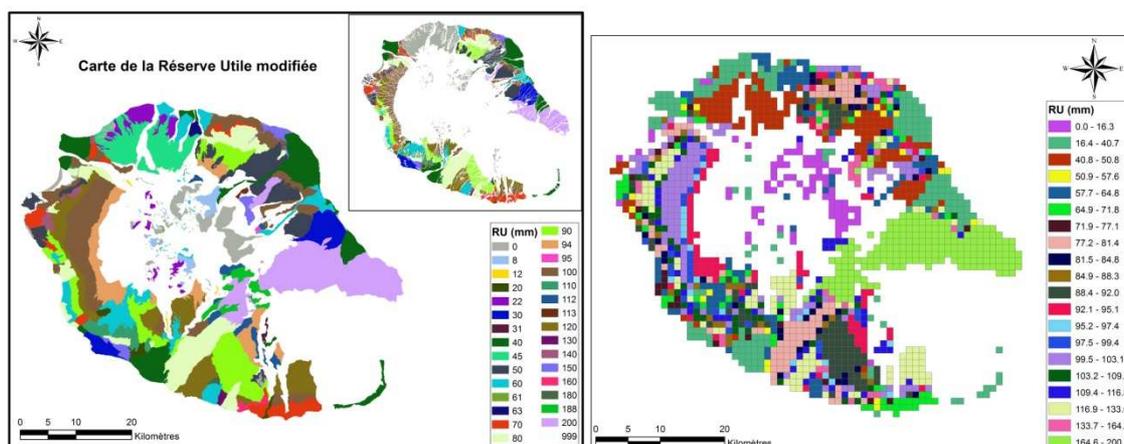


Illustration 89 - Carte simplifiée de la réserve utile

Afin de compléter cette carte de la réserve utile, il a été fait appel à :

- des résultats de modélisations réalisées antérieurement avec le modèle hydrologique GARDENIA du BRGM (modèle Global à Réservoirs pour la simulation des Débits et des Niveaux Aquifères). Elles sont synthétisées dans les rapports BRGM/RP-57185-FR et BRGM/RP-59245-FR de Aunay et al. (2009 et à paraître). Les bassins versants concernés sont présentés sur **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**
- des bilans réalisés lors de différentes études ayant fait l'objet d'une synthèse en 2006 par le BRGM (rapport BRGM/RP-55035-FR)

Les valeurs de réserve utile ont été déterminées, suivant les sols de la carte pédologique, afin que le bilan de ces bassins, au droit des stations hydrométriques, soit identique au bilan calculé ou au bilan obtenu par modélisation. Une extrapolation de ces valeurs a ensuite été réalisée sur les autres bassins versants possédant des sols similaires.

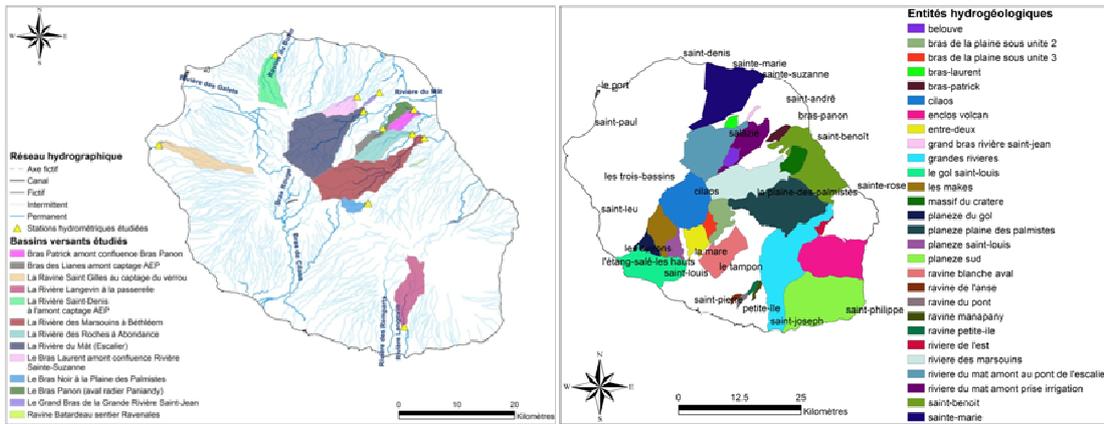


Illustration 90 - Bassins versants ayant fait l'objet de bilans (droite) ou modélisés (gauche)

La carte résultante de la réserve utile ainsi obtenue figure sur l'Illustration 91 - Carte globale résultante des hypothèses effectuées sur les valeurs de RU

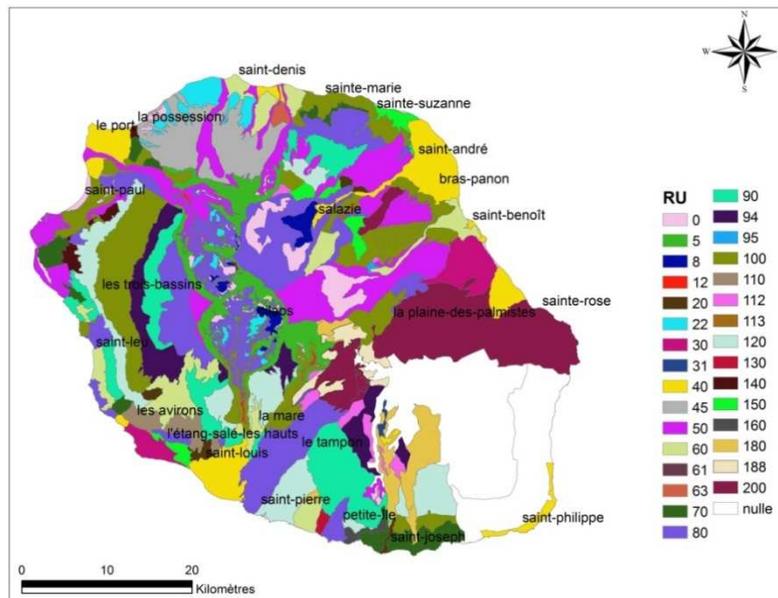


Illustration 91 - Carte globale résultante des hypothèses effectuées sur les valeurs de RU

5.3. CALCUL DE LA PLUIE EFFICACE

L'illustration 92 - Carte de la pluie efficace moyenne

fournit par maille la pluie efficace calculée à l'aide des valeurs des paramètres définies sur les illustrations 79, 86 et 87.

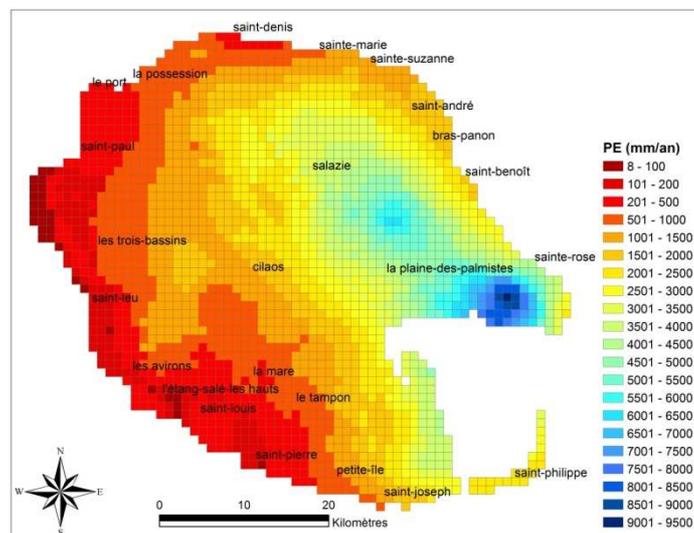


Illustration 92 - Carte de la pluie efficace moyenne

5.3.1. PLUIE EFFICACE A L'ECHELLE DES MASSES D'EAU

Dans le SDAGE (2009), seize masses d'eau souterraines sont identifiées (Illustration 93 - Masses d'eau souterraine définies dans le SDAGE Réunion

). L'illustration 94 fournit la valeur moyenne annuelle de la pluie efficace au droit des différentes masse d'eau hormis pour les aquifères de Ste Rose et de St Philippe car le maillage ne couvre qu'une minorité de leur surface. Concernant l'aquifère de Saint-Joseph, une partie de la masse d'eau se trouve en dehors du maillage mais les résultats sont tout de même présentés à titre indicatif.

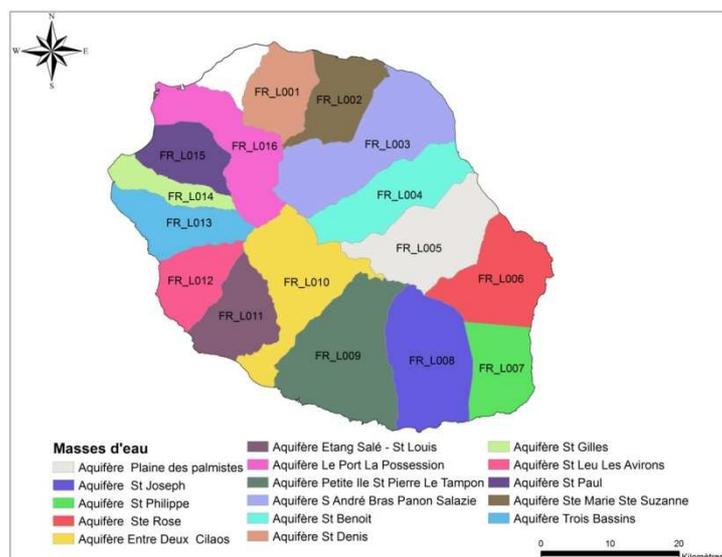


Illustration 93 - Masses d'eau souterraine définies dans le SDAGE Réunion

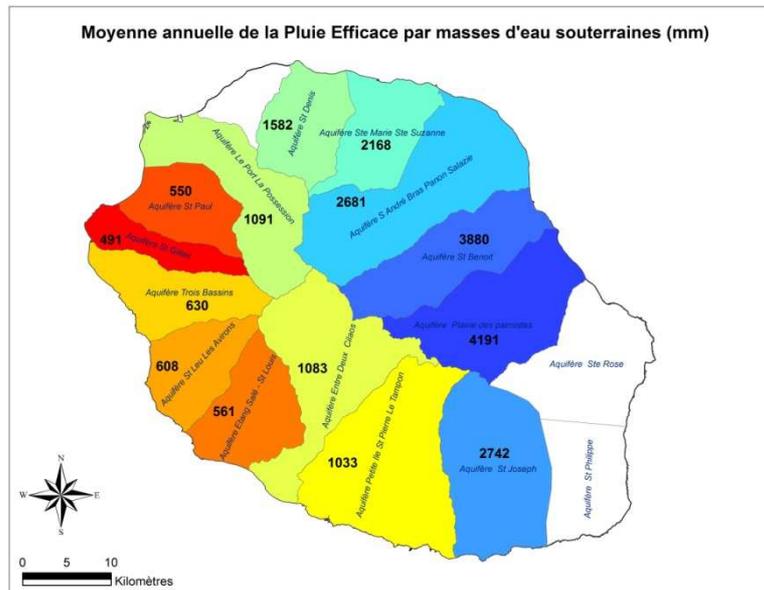


Illustration 94 - Moyenne annuelle de la pluie efficace par masse d'eau souterraine

5.3.2. DECOMPOSITION DE LA PLUIE EFFICACE

5.3.2.1. METHODOLOGIE UTILISEE

Deux approches sont ici couplées pour évaluer la répartition ruissellement/infiltration de la pluie efficace : d'une part, les modélisations globales et d'autre part, l'utilisation des pluies efficaces et de l'IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux). Cet indice, développé par le BRGM dans le cadre d'études de vulnérabilité des nappes, est utilisé pour évaluer le fractionnement de la pluie efficace entre ruissellement et infiltration.

5.3.2.2. MODELISATION

La modélisation des systèmes hydrologiques est un prolongement du calcul de la pluie efficace. Ici, les modèles sont utilisés (après calage) pour décomposer l'écoulement global (la pluie efficace) en : écoulement rapide (le ruissellement en général) et en "écoulement lent" (la recharge) qui alimente effectivement les nappes.

Il faut toutefois être prudent dans l'interprétation de cette décomposition, dont on ne peut pas toujours garantir qu'elle représente une solution unique.

5.3.2.3. IDPR (INDICE DE DEVELOPPEMENT ET PERSISTANCE DES RESEAUX)

L'IDPR a été calculé à la Réunion (Illustration 95) dans le cadre d'un projet sur les Bassins d'Alimentation de Captage, Aunay et al. (2010) et la définition suivante est extraite du rapport.

L'idée qui sous-tend l'IDPR découle des observations suivantes, **l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent**. Dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, de perméabilité nulle, seule la pente et la morphologie des reliefs guident la mise en place des cours d'eau. La recherche des talwegs ou lignes de plus grande pente qui par la gravité, rassemblent les eaux de ruissellement, doit donc conduire à la reproduction du réseau hydrographique.

Or dans la réalité, ce réseau hydrographique théorique diffère du réseau naturel et cette différence traduit la complexité du milieu naturel. Les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol ont en effet une influence significative sur l'établissement des réseaux hydrographiques.

La nature des surfaces des bassins a un rôle primordial sur le comportement hydrologique de ceux-ci, notamment en fonction de la lithologie, de la pédologie et de la couverture végétale. Ces paramètres influencent grandement la perméabilité et la rugosité de la surface, qui conditionnent à leur tour la vitesse du ruissellement et le rapport de l'écoulement sur l'infiltration, appelé aussi coefficient d'écoulement.

La densité de drainage est donc un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage élevée.

L'IDPR devient ainsi le moyen de quantifier ce rôle en comparant **un réseau théorique** établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (*indice de développement ID*), **au réseau naturel** mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (*de persistance des réseaux PR*). L'indice de développement et de persistance des réseaux présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux.

L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Il se calcule en comparant le réseau hydrographique naturel au réseau de talwegs calculés.

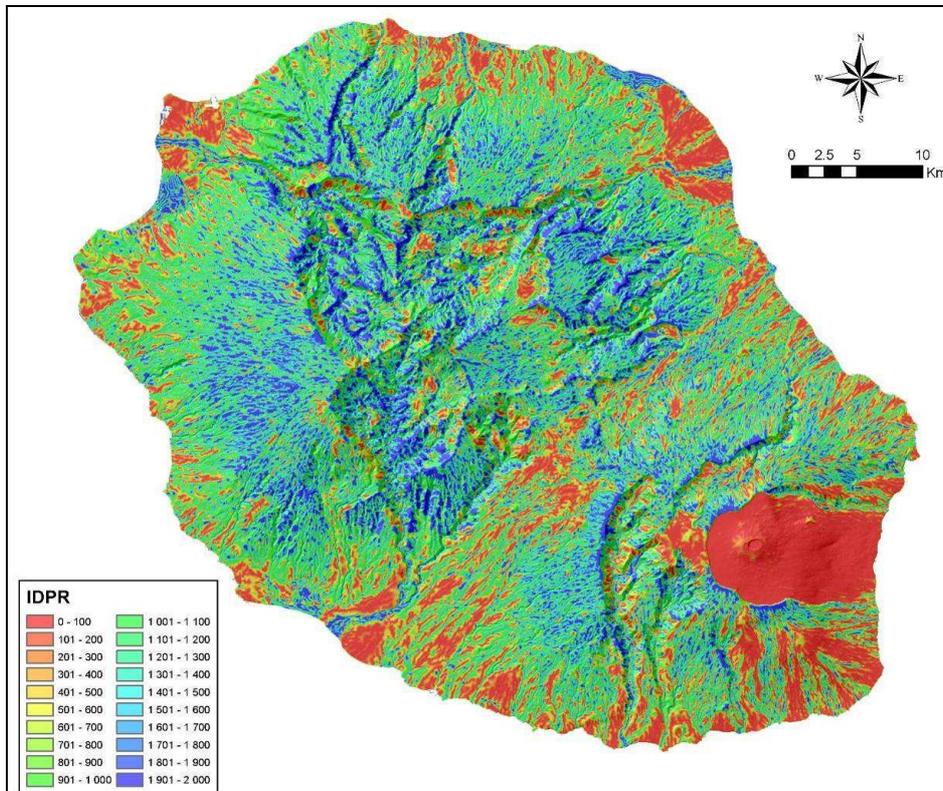


Illustration 95 - Résultat du calcul IDPR. Les zones rouges et bleues indiquent respectivement les zones majoritairement infiltrantes et ruisselantes

5.3.2.4. DETERMINATION DE LA PART DE RUISSELLEMENT ET D'INFILTRATION

L'idée est de répartir la pluie efficace entre ruissellement et infiltration en fonction des valeurs de l'IDPR. Pour cela, une comparaison entre la valeur moyenne de l'IDPR calculée sur les bassins versants étudiés et les pourcentages de ruissellement et d'infiltration calculés par les modèles est faite (Illustration 96 pour les modélisations globales longues durées, Illustration 53 pour les unités hydrogéologiques déterminées par Frissant). Parmi ces unités hydrogéologiques, seules celles ayant un bilan équilibré ont été conservées (somme du ruissellement et de l'infiltration égale à 100% de la PE).

Les classes d'IDPR et les pourcentages retenus pour la répartition entre infiltration et ruissellement sont présentées dans l'illustration 97.

IDPR	% Infiltration	% Ruissellement
0-250	99%	1%
250-500	85%	15%
500-750	70%	30%
750-1000	60%	40%
1000-1250	40%	60%
1250-1500	30%	70%
1500-1750	15%	85%
1750-2000	1%	99%

Illustration 96 - IDPR et pourcentage de répartition entre ruissellement et infiltration

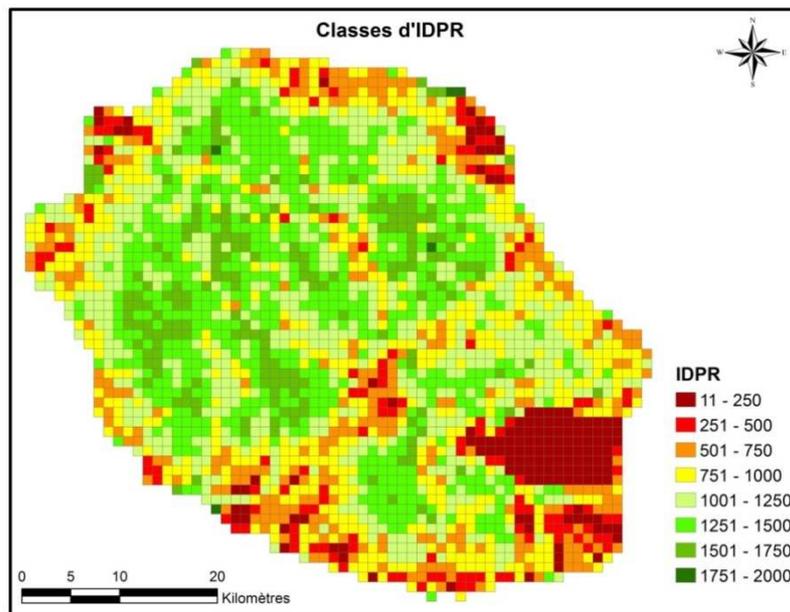


Illustration 97- Classes d'IDPR choisies

5.3.2.5. ESTIMATION DE LA RECHARGE

L'estimation des pourcentages d'infiltration à partir des valeurs d'IDPR et les valeurs de pluie efficace sur les mailles de 1 km² ont permis de calculer la carte de la recharge moyenne (Illustration 98). Les bilans généraux sur les bassins versants modélisés et sur les unités hydrogéologiques sont récapitulés sur l'illustration 99. Cette infiltration/recharge rejoindra dans un premier temps les aquifères superficiels. L'alimentation de réservoirs plus profonds dépendra de la structure

géologique du sous-sol, de l'évolution de la perméabilité avec la profondeur, mais aussi et surtout de la distribution des charges hydrauliques. Une diminution de perméabilité avec la profondeur et l'âge des formations (Folio, 2001) limitera les circulations d'eau profondes et induira des circulations superficielles vers des émergences locales.

Cette première idée des quantités d'eaux disponibles pour l'infiltration aidera à l'estimation des volumes exploitables au sein de l'aquifère. En général, afin de limiter les impacts environnementaux, l'exploitation est très significativement inférieure aux volumes ainsi estimés (recharge naturelle).

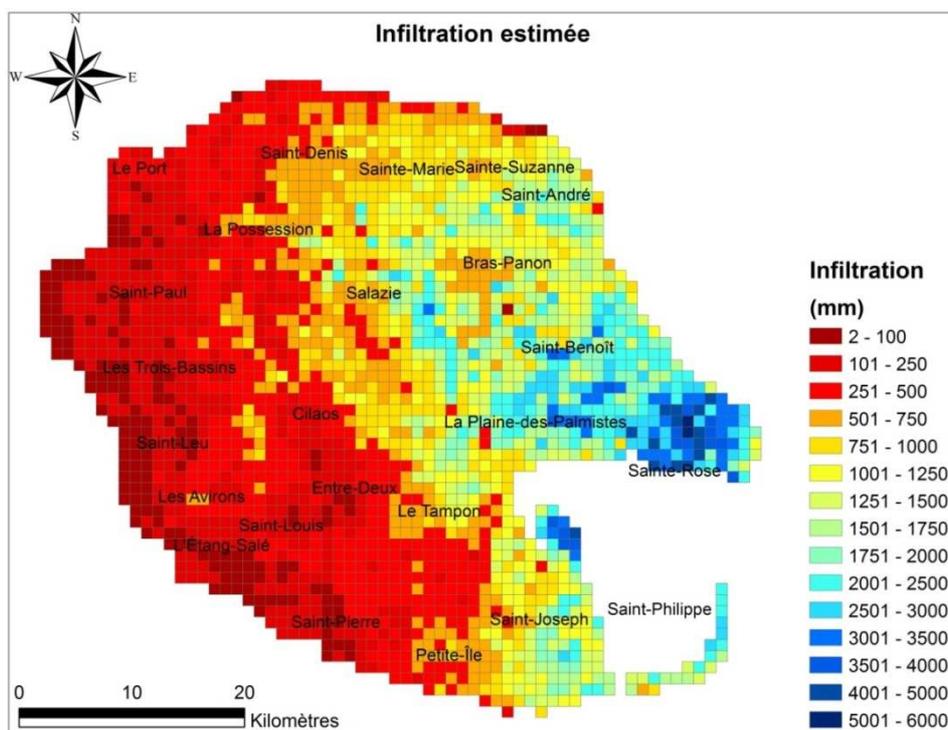


Illustration 98 - Recharge estimée par le calcul de pluie efficace et par l'analyse de l'IDPR à l'échelle de l'île

Par ailleurs, l'exploitation des aquifères génère en général des modifications des directions d'écoulement des eaux souterraines qui, dans certaines configurations, sont susceptibles d'augmenter les apports d'eau au sein de l'aquifère, par exemple en rechargeant l'aquifère en période de hautes eaux (saison des pluies).

5.3.3. BILAN A L'ECHELLE DES MASSES D'EAU

Un bilan des résultats à l'échelle de ces masses d'eau est proposé en dehors de l'aquifère de Ste Rose et de St Philippe car le maillage ne couvre qu'une minorité de leur surface. Concernant l'aquifère de Saint-Joseph, une partie de la masse d'eau se trouve en dehors du maillage mais les résultats sont tout de même présentés à titre indicatif.

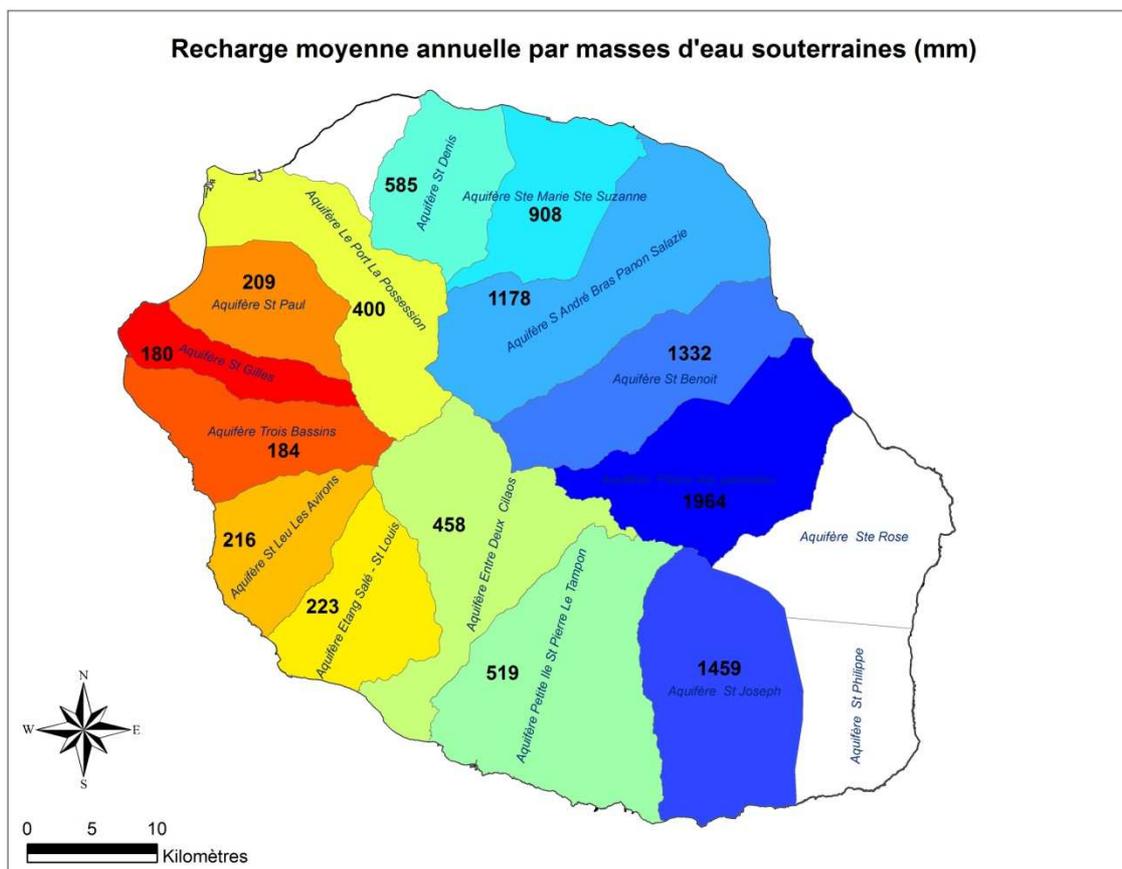


Illustration 99 - Recharge annuelle moyenne par masses d'eau souterraine

NOM	CED_EU	surface	Pluie moyenne calculée	PE moyenne calculée	% Ruiss	% Inf	Ruissellement moyen calculé	Infiltration moyenne calculée
Aquifère St Denis	FR_L001	108.8	2406.3	1581.9	0.6	0.4	996.5	585.3
Aquifère Ste Marie Ste Suzanne	FR_L002	113.8	3200.9	2168.1	0.6	0.4	1260.5	907.7
Aquifère St André Bras Panon Salazie	FR_L003	257.4	3684.9	2680.8	0.6	0.4	1503.3	1177.6
Aquifère St Benoit	FR_L004	159.5	4807.9	3880.0	0.7	0.3	2547.8	1332.2
Aquifère Plaine des palmistes	FR_L005	193.0	5116.7	4190.6	0.5	0.5	2226.3	1964.3
<i>Aquifère St Joseph</i>	<i>FR_L008</i>	<i>210.0</i>	<i>3577.0</i>	<i>2741.8</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>1282.6</i>	<i>1459.2</i>
Aquifère Petite Ile St Pierre Le Tampon	FR_L009	262.7	1796.5	1032.8	0.5	0.5	513.4	519.5
Aquifère Entre Deux Cilaos	FR_L010	210.8	1636.5	1082.8	0.6	0.4	624.7	458.2
Aquifère Etang Salé - St Louis	FR_L011	119.7	1228.7	561.4	0.6	0.4	338.1	223.3
Aquifère St Leu Les Avirons	FR_L012	99.4	1254.1	608.3	0.6	0.4	392.2	216.0
Aquifère Trois Bassins	FR_L013	115.8	1105.6	629.6	0.7	0.3	445.7	183.9
Aquifère St Gilles	FR_L014	60.8	994.2	490.6	0.6	0.4	311.0	179.6
Aquifère St Paul	FR_L015	94.6	1110.8	549.8	0.6	0.4	340.8	209.0
Aquifère Le Port La Possession	FR_L016	170.7	1641.1	1090.9	0.6	0.4	690.5	400.4

Illustration 100 - Bilans obtenus en moyennant les résultats sur les masses d'eau

5.3.4. SENSIBILITE DE LA PLUIE EFFICACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Afin d'évaluer un impact des paramètres climatiques, notamment de la température, sur les ressources en eau une évaluation des pluies efficaces a été réalisée en considérant une augmentation de l'ETP de 10% sur l'ensemble de l'île (augmentation correspondant à une élévation de la température moyenne d'environ 2°C).

Les baisses les plus significatives de Pluie Efficace se situent (Illustration 101) sur : la bande littorale ouest (de Saint-Paul à Petite-Ile) et les hauts de Saint-Louis avec plus de 10% d'écart sur la pluie efficace entre Saint-Leu et l'Etang-Salé et un peu moins de 10% d'écart de PE vers Saint-Gilles, l'Hermitage et Saint-Pierre; puis, la bande littorale Nord-Est de Saint-Denis à Saint-André (plus de 5% d'écart).

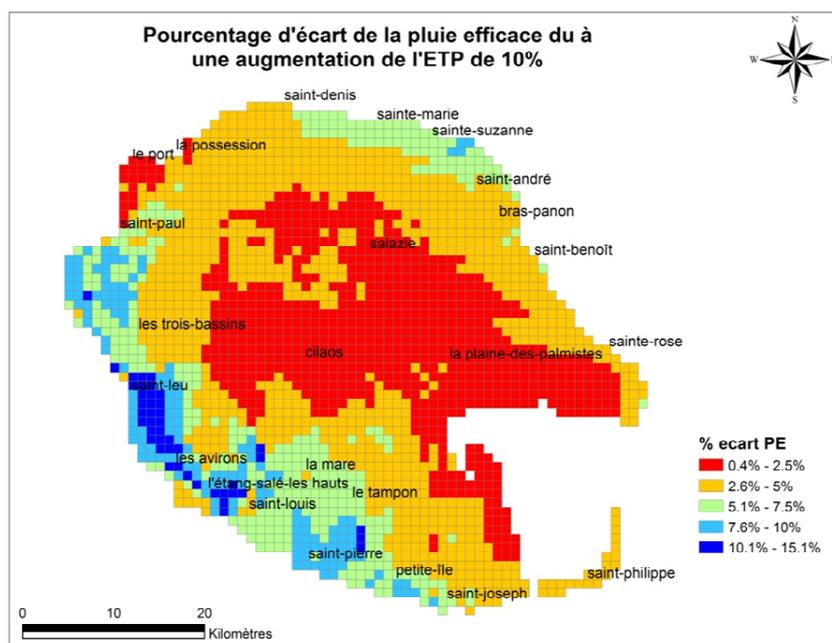


Illustration 101 - Variation de la pluie efficace liée à une augmentation de l'ETP de 10% sur l'ensemble de l'île

A l'échelle des masses d'eau, l'écart sur les pluies efficaces varie entre 2,1 et 5,4%. L'écart maximum est localisé sur l'aquifère de Saint-Leu-Les Avirons et l'aquifère de l'Etang Salé - St Louis. Les aquifères de Saint-Philippe, Saint-Gilles et Saint-Paul sont également bien impactés. Le minimum d'impact se situe à l'est et en altitude (plaine des palmistes).

5.4. CONCLUSION

Bien que la Réunion bénéficie globalement d'un niveau de précipitations important, les situations extrêmement contrastées que connaît l'île font que des zones sont d'ores et déjà très déficitaires en matière de ressource en eau. En effet, en faisant obstacle aux Alizés, les reliefs importants de la partie centrale font que ces derniers ainsi que la région au vent (est de l'île) bénéficient de niveaux de précipitations élevés au détriment de la partie située sous le vent (ouest de l'île).

Les conséquences de ce fort déséquilibre géographique de la pluviométrie sont aggravées par une répartition contrastée des pluies au cours de l'année. De cette situation résulte un très fort déséquilibre en matière de ressource en eau entre les parties est et ouest de l'île. Des transferts d'eau de l'est vers l'ouest de l'île au moyen de tunnel hydraulique devraient prochainement atténuer de façon sensible ces disparités de ressources.

L'impact du changement climatique pourrait, d'après les estimations réalisées, induire une augmentation de température de l'ordre de 2°C ce qui aurait pour conséquence d'augmenter l'ETP de l'ordre de 10% (variable suivant l'altimétrie), et réduire ainsi d'autant les ressources mais qui resteraient globalement suffisantes pour la satisfaction des besoins des populations et du bon état environnemental. Il est toutefois probable que cet impact serait plus prononcé sur la cote sous le vent.

La problématique d'invasion saline des aquifères littoraux reste identique à celles évoquée précédemment pour toutes les îles. Notons cependant que la pression démographique induit un fort développement de l'urbanisation de certaines zones littorales avec pour conséquence potentielle une surexploitation des aquifères littoraux exposant ces derniers à l'invasion saline.

5.5. BIBLIOGRAPHIE

Alery Garnier Langlois (1954) - Application des méthodes de Thornthwaite à l'esquisse d'une description agronomique du climat de la France. In La Météorologie, Octobre-décembre 1954, pp. 345-367

Allen R. B., Peirera L. S., Raes D., Smith M. (1998) – Crop Evapotranspiration. FAO irrigation and drainage paper n°56. Fao edit. 300 p.

Aunay B., Lachassagne P. et Stollsteiner P. (2009) – Identification des modalités d'exploitation des ressources en eaux souterraines du domaine d'altitude de l'Est de la Réunion – Phase 2. BRGM/RP-57185-FR.125p.

Aunay B., Dewandel B., Ladouche B., Oliva Z., Stollsteiner P (à venir) - Identification des modalités d'exploitation des ressources en eaux souterraines du domaine d'altitude de l'Est de La Réunion – Phase 3. BRGM/RP-59245-FR.

Aunay B., Brugeron A., Vaudour K., Wuilleumier A. (2010) - Détermination de la vulnérabilité, des pressions et des risques de pollution sur cinq Bassins d'Alimentation de Captage prioritaires à l'Ile de la Réunion. Rapport BRGM RP-59057-FR.

Bargeas A. (1984) – Evaluation globale de la ressource en eau de l'île de La Réunion – Apports de la simulation par modèles hydrologiques. Rapport BRGM 84SGN232.

BRGM (1986) - Atlas hydrogéologique de La Réunion – 86 REU 30.

BRGM (2002) – Cartographie de la vulnérabilité des grands aquifères stratégiques à La Réunion. – Système hydrogéologique de la rivière Saint-Pierre – rapport BRGM R-38361.

Chopard Mezino Natival (2003) - Fluctuation saisonnière de l'Evapotranspiration (ET0 Penman-Monteith) dans le Nord, l'Est et le Sud-est de l'île de la Réunion. Influence de l'altitude et comparaison avec l'Ouest et le Sud.

Dumon A., Mougins B., Ladouche B., Allier D., Vittecoq B. (2009) – Contribution à l'évaluation de la ressource en eau souterraine de la Basse-Terre – Guadeloupe – rapport BRGM/RP-56821-FR.

Enilorac M. P. (1986) – Contribution à l'étude de l'évapotranspiration potentielle sous climat tropical humide et d'altitude. Thèse de doctorat ESAT, Montpellier.

Erhard-Cassegrain A. et Margat J. (1983) – Introduction à l'économie générale de l'eau. Masson, Paris, 361 p.

Frissant N., Barthélemy L., Petit V. (2006) – Synthèse des ressources en eaux souterraines potentiellement mobilisables à la Réunion. Rapport BRGM/RP-55035-FR.

Genera B. (1990) – Tropicalisation of automatic weather stations and initial results for improved irrigation water management in Reunion Island. *Agricultural Water Management*, 17 (1990) 141-149.

Grunberger (1989) – Étude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté, massif du Piton des Neiges, île de La Réunion. Thèse de Doctorat Université Paris XI, 197 p.

Join (1991) – Caractérisation hydrogéologique du milieu volcanique insulaire. Le Piton des Neiges – île de La Réunion. Thèse de Doctorat Université Montpellier II, 197 p. + annexes.

Lavabre J., Fouchier C., Folton N., Gregoris Y. (2003) – SHYREG : une méthode pour l'estimation régionale des débits de crue. Application aux régions méditerranéennes françaises. *Ingénieries N° spécial* 2003, p. 97 à 111.

Mardhel V. (2000) – Propositions de mesures de préservation à mettre en œuvre sur les aquifères stratégiques de l'île de La Réunion. Rapport BRGM/R-50197-FR.

Mardhel V. (2001) – Evaluation et cartographie de la vulnérabilité des grands aquifères de l'île de La Réunion – Étude de l'aquifère de la Plaine des Galets (rive droite de la rivière des Galets) -Rapport BRGM/RP-50590-FR.

Margat J. (1976) – Analyses des systèmes aquifères et évaluation des ressources en eau souterraine. Rapport BRGM. 76 SGN 532 AME.

Neppel L., Arnaud P., Lavabre J. (2007) – Connaissance régionale des pluies extrêmes. Comparaison de deux approches appliquées en milieu méditerranéen. *C. R. Geoscience* 339 (2007) 820-830.

Normand M., Thiéry D. avec la collaboration de Petit V. (2006) – Projet DYNTOR. Modélisation hydrologique globale pluie-débit des crues des ravines de la Réunion. Rapport BRGM/RP-54593-FR.

Penman H. L. (1948) – Natural evapotranspiration from openwater, bare soil and grass. *Proc. Roy; Soc. London* (1) 193: 120-145.

Pinson S., Allier D., Stollsteiner P., Mardhel V., Wuilleumier A. (2010) – Etude de la contribution des eaux souterraines aux écoulements totaux d'eau de surface sur le bassin Loire-Bretagne. Rapport BRGM RP-57608-FR, 164 p.

Schéma Directeur d'aménagement et de gestion des eaux souterraines de la Réunion (2010-2015) – Comité de Bassin.

Steenhoudt M. (1979-1983) – Programme départemental d'études des ressources en eau pour l'aménagement des Hauts de la Réunion. Rapports BRGM SGR/REUNION.

Thiéry D. (2003) – Logiciel GARDENIA version 6.0 – Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-52832-FR.

Thornthwaite C.U. (1946) - An approach toward a national classification of climate. Trans. Amer. Geophys. Union, vol. 27, pp.99-106.

Violette S., Ledoux E., Goblet P., Carbonnel J.-P. (1997) – Hydrologic and thermal modeling of an active volcano: the Piton de la Fournaise, Reunion. Journal of Hydrology 191 (1997) 37-63.

Vittecoq B., Lachassagne P., Lanini S., Ladouche B., Marechal J.C., Petit V. (2007) – Elaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caractérisations quantitatives. Rapport BRGM/RP-55099-FR.

SITES INTERNET :

www.office-eau974.fr

www.meteo.fr/temps/La_Reunion/atlas_clim/essai2.htm

www.margouilla.net/carto