



**DOCUMENT PUBLIC**

# ***Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe)***

***Phase 1 : méthodologie de détermination de la vulnérabilité***

**Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service Public du BRGM 02EAU718**

**S. Bézèlgues et E. des Garets  
avec la collaboration de  
V. Mardhel  
et N. Dörfliger**

**novembre 2002  
BRGM/RP-51783-FR**



**Mots clés :** Vulnérabilité intrinsèque, vulnérabilité spécifique, eaux souterraines, cartographie, DRASTIC, indexation, pondération, Grande-Terre, Marie-Galante, Guadeloupe.

**En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :**

**S. Bézègues et E. des Garets avec la collaboration de V. Mardhel et N. Dörfliger (2002)  
– Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Phase 1 - Définition de la méthode de détermination de la vulnérabilité.  
Rapport BRGM-51783-FR, 41 p., 7 fig., 7 tab.**

© BRGM, 2002, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Les eaux souterraines de Grande-Terre et de Marie-Galante représentent une ressource en eau d'importance stratégique non négligeable, puisqu'elle est la seule en ce qui concerne Marie-Galante et qu'elle représente pour la Guadeloupe continentale une solution alternative aux pénuries régulières des périodes de carême. Sa protection est de première importance. Or, les acteurs de l'eau guadeloupéens manquaient d'un outil complet d'aide à la prise de décision en matière d'aménagement leur permettant de tenir compte des risques encourus par les eaux souterraines. Conscientes de cette lacune, la DIREN et la DAF ont réinitié le processus de définition de la vulnérabilité des nappes d'eaux souterraines aux pollutions en demandant au BRGM de définir les bases de sa cartographie : définition des critères à prendre en compte et de la méthode la plus adaptée à la problématique locale.

Le BRGM a pu répondre à cette demande :

- à partir de l'analyse bibliographique des travaux les plus récents en matière de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines il a pu dresser un inventaire des critères de vulnérabilité et des méthodes de cartographie couramment utilisés ;
- en proposant une cartographie basée sur la méthode DRASTIC adaptée au contexte géologique et hydrogéologique de Grande-Terre et de Marie-Galante. La méthode retenue s'appuie sur 7 critères de vulnérabilité :
  - Ruissellement-recharge ;
  - Couverture pédologique ;
  - Type de nappe ;
  - Nature lithologique et perméabilité de la Zone Non Saturée ;
  - Epaisseur de la Zone Non Saturée ;
  - Fracturation ;
  - Points sensibles (morphologiques et anthropiques).

La carte finale de vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante sera obtenue par superposition pondérée de cartes de vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis de chacun de ces critères. Elle sera également renseignée sur la position du biseau salé et sur la localisation d'installations existantes correspondant à un aléa « pollution » pour les eaux souterraines.

## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>2. La vulnérabilité des nappes souterraines .....</b>	<b>8</b>
2.1. Notions générales .....	8
2.2. Les critères de vulnérabilité.....	9
2.2.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque.....	9
2.2.2. Critères de vulnérabilité spécifique .....	11
2.3. Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères .....	14
2.3.1. Généralités.....	14
2.3.2. Méthodes .....	15
2.3.3. Conclusion.....	23
<b>3. Contexte naturel des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante .....</b>	<b>24</b>
3.1. Cadre géographique.....	24
3.1.1. Grande-Terre .....	24
3.1.2. Marie-Galante.....	25
3.2. Contexte géologique.....	25
3.2.1. Grande-Terre .....	25
3.2.2. Marie-Galante.....	28
3.3. Contexte hydrogéologique.....	30
3.3.1. Grande-Terre .....	30
3.3.2. Marie-Galante.....	32
<b>4. Vulnérabilité des eaux souterraines de Grande-Terre et Marie-Galante .....</b>	<b>34</b>
4.1. Les critères de vulnérabilités .....	34
4.1.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque.....	34
4.1.2. Vulnérabilité spécifique.....	36
4.1.3. Prise en compte du risque.....	36
4.2. Méthode de détermination de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante .....	36
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>38</b>
<b>6. Bibliographie.....</b>	<b>39</b>

## Liste des illustrations

### FIGURES

Figure 1 : Système empirique GOD ; pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (d'après Foster, 1987).....	17
Figure 2 : Critères relatifs à la surface du sol (M.F. Suais et al., 1990).....	23
Figure 3 : Coupe schématique de la série plio-pléistocène de la Grande-Terre. 1. Nodules algaïques 2. Polypiers branchus 3. Polypiers massifs (d'après Garrabe et Andreieff, 1988) .....	27
Figure 4 : Toponymie et morphologie de la Grande-Terre (d'après GARRABE et ANDREIEFF, 1988).....	28
Figure 5 : Esquisse morphologique et toponymie de Marie-Galante échelle 1/100 000 (Gervaise et Milville, 1999) .....	29
Figure 6 : Coupe schématique de l'aquifère de Grande-Terre.....	31
Figure 7 : Schémas synthétiques de l'hydrodynamisme de Marie-Galante (Pointet, 1983).....	33

### TABLEAUX

Tableau 1 : Critères de vulnérabilité couramment pris en compte.....	13
Tableau 2 : Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994).....	19
Tableau 3 : Facteurs de pondération des différents critères de la méthode DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994). .....	20
Tableau 4 : Paramètres valeur et poids retenus pour l'élaboration d'une carte de vulnérabilité (Alamy, Langevin, 1989). .....	21
Tableau 5 : Paramètres pris en compte dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité et de sensibilité du milieu souterrain aux risques de pollution (Ricour, 1988). ....	22
Tableau 6 : Paramètres pris en compte dans l'élaboration de la carte vulnérabilité (valeur finale = valeur initiale * poids global) (Munoz, Langevin, 1991). .....	22
Tableau 7 : Critères de vulnérabilité intrinsèque et spécifique proposés pour les nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante.....	34

# 1. Introduction

Les îles de Grande-Terre et de Marie-Galante renferment chacune une nappe d'eau souterraine exploitée essentiellement pour l'alimentation en eau potable, mais également comme eau agricole et industrielle. Ces nappes représentent un enjeu stratégique pour la Guadeloupe et doivent être protégées des pollutions susceptibles d'altérer leur qualité et donc de limiter leur usage.

La cartographie de la vulnérabilité de la nappe de Grande-Terre, initiée en 1989 par la réalisation de la "carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe de Grande-Terre au 1/50 000<sup>ème</sup>" s'est poursuivie en 1994, sur l'initiative du Conseil Régional de Guadeloupe, par la "cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe de Grande-Terre au 1/25 000<sup>ème</sup> dans la région Pointoise (coupure IGN 4603G)".

Aujourd'hui, la DIREN et la DAF souhaitent compléter ces travaux car ces cartes constituent des outils de gestion rationnelle des eaux souterraines :

- outils pédagogiques et éducatifs pour une sensibilisation à la protection des eaux souterraines ;
- outils d'orientation de la politique générale de gestion de la qualité des eaux souterraines et pour la police de l'eau ;
- outils d'aide à la décision en matière d'aménagement ;
- outils pour l'aménagement et la protection des ressources en eau et des captages.

*« La cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère permet une meilleure gestion de la nappe et des interventions rapides et appropriées en cas de pollution » (Graillat A. et Bouchet C., 1994).*

Elles souhaitent réaliser les cartes de vulnérabilité aux pollutions des secteurs nord et est en Grande-Terre et de Marie-Galante et réactualiser, s'il y a lieu, la carte de la région Pointoise.

L'échelle de la cartographie au 1/25 000<sup>ème</sup> a été retenue en 1994 pour la zone de Pointe-à-Pitre en raison de l'importance économique et stratégique de la nappe. Elle sera conservée pour les cartes complémentaires.

Afin de répondre aux attentes de la DIREN et de la DAF, le BRGM a proposé un programme de travaux en cinq phases : une première phase de définition de la méthodologie à employer et quatre autres phases de réalisation proprement dite des cartes.

Le présent rapport correspond à la phase 1 de ce programme de travaux : il vise à définir les critères de vulnérabilité les plus pertinents correspondants au contexte hydrogéologique des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante ainsi que la méthode de cartographie adaptée.

Il se décompose en trois parties :

- Inventaire et présentation des différents critères et méthodes actuels de cartographie de la vulnérabilité des nappes souterraines.
- Présentation du contexte et du fonctionnement hydrogéologiques des nappes.
- Sélection des critères et de la méthode de cartographie adaptés au contexte guadeloupéen.

## 2. La vulnérabilité des nappes souterraines

Une analyse bibliographique des travaux les plus récents en matière de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines nous a permis de définir :

- les notions générales de vulnérabilité des eaux souterraines ;
- les critères couramment retenus pour la décrire ;
- les méthodes employées actuellement pour la représenter.

### 2.1. NOTIONS GENERALES

Une eau est polluée lorsque sous l'effet de l'activité humaine, elle perd au moins une de ses fonctions (ou un de ses usages). Elle devient alors impropre à répondre à la demande d'utilisation et peut présenter un danger pour l'environnement. Les eaux souterraines se caractérisent par leur teneur en substances minérales dissoutes d'origine naturelle (géologique) ; c'est le "bruit de fond". Leur degré de pollution est apprécié par la mesure de l'écart entre le "bruit de fond" et leurs caractéristiques physico-chimiques (Mardhel, 2001).

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions suivant les caractéristiques de ce milieu.

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Schnebelen et al., 2002) :

- la **vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines ;
- la **vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

Le présent rapport s'attache à toujours distinguer les deux types de vulnérabilité car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut-être considérée comme invariante dans le temps (à notre échelle de travail) alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux sources de pollution) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. De plus, nous avons considéré qu'il était préférable de faire la différence entre les caractéristiques propres du milieu et l'existence de sources de pollutions.

Pour tenir compte des objectifs de planification à long terme de la gestion de l'eau en Guadeloupe, nous nous sommes prioritairement intéressés à la vulnérabilité intrinsèque des nappes. Cependant, la vulnérabilité spécifique a été prise en compte de façon à répondre à une problématique spécifique.

## 2.2. LES CRITERES DE VULNERABILITE

### 2.2.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée qui contrôlent le comportement des polluants. L'ensemble des critères de vulnérabilité rencontrés dans la littérature sont exposés ci dessous.

#### **Critères relatifs au sol :**

- **Ruissellement – infiltration** : le ruissellement et l'infiltration efficace (quantité d'eau s'infiltrant jusqu'à la nappe) sont représentatifs de la recharge de la nappe. Ils sont étroitement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles et peuvent être représentés dans l'espace grâce à la méthode dite des « **indices de persistance des réseaux** ». Cette méthode permet la représentation de zones de recharge préférentielle de la nappe. Elle se base sur la comparaison de la topographie traduite en zones potentiellement favorables au ruissellement ou à l'infiltration (à partir du traitement du MNT) avec le réseau hydrographique pris comme représentatif de la réalité de la répartition du ruissellement et de l'infiltration.
- **Couverture Pédologique** : la nature, la texture, la teneur en argiles et en matière organique, ainsi que la puissance (ou épaisseur) et la perméabilité verticale des sols régulent la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la zone non saturée.

#### **Critères relatifs à la zone non saturée :**

- **Profondeur de la nappe libre** (ou épaisseur de la Zone Non Saturée) : l'épaisseur de la ZNS conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc sa possible dégradation en cours de transfert.
- **Amplitude de battement de nappe** : l'amplitude de battement de la nappe, dans la mesure où elle est significative, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol + ZNS). De ce fait elle peut devenir un critère de vulnérabilité.
- **Perméabilité verticale de la ZNS** : elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.
- **Structure de la ZNS** : les variations de faciès, l'épaisseur des discontinuités de faciès et leur position dans le profil vertical, la texture, la teneur en m.o. (matières organiques) et en argile des formations, sont autant de facteurs qui conditionnent la migration de fluides vers la nappe.

**Critères relatifs à la zone saturée :**

- **Type de nappe (libre ou captive) :** l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables.
- **Paramètres hydrodynamiques** des formations aquifères (transmissivité (T), perméabilité (K), coefficient d'emménagement (s), gradient hydraulique (i)) : ils déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe et les temps de résidence de ceux-ci dans la zone saturée.
- **Piézométrie :** elle rend compte de la géométrie de la nappe et de son fonctionnement hydrodynamique qui peuvent évoluer au cours d'un cycle hydrologique complet. Entre les périodes de hautes eaux et de basses eaux par exemple, les directions d'écoulement et/ou les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser.
- **Direction et sens d'écoulement :** ils déterminent les espaces susceptibles d'être atteint par un polluant une fois que celui-ci a atteint la nappe.
- **Type de système hydrogéologique :** la vulnérabilité d'un système hydrogéologique peut être appréhendée à partir de la connaissance de sa réactivité aux impulsions pluviométriques. Un système au caractère transmissif fort se caractérise par des temps de transfert rapides des eaux depuis la surface vers la zone saturée et par de faibles temps de séjour. Il s'agit par exemple des systèmes carbonatés fortement karstifiés. Un système au caractère inertiel et/ou capacitif fort se caractérise par des temps de transfert et des temps de séjours longs.
- **Relations nappe/cours d'eau :** les relations entre les eaux superficielles et les eaux souterraines peuvent être de deux types, drainage ou alimentation, et conditionnent la possibilité de contamination des eaux souterraines à partir des eaux superficielles.
- **Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve) :** la quantité d'eau stockée dans l'aquifère détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe.
- **Présence ou non d'un horizon moins perméable** et position de celui-ci. Cet horizon va déterminer le caractère libre ou captif de la nappe.

### **Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée**

- **Fracturation** (directions et densité). Des discontinuités verticales telles que les failles peuvent, dans certaines conditions, jouer le rôle de drain et augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe.
- **Recharge** : il s'agit de la quantité d'eau atteignant la Zone Saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (ETP, précipitations), mais également de la topographie et de la nature des formations. Elle peut être appréhendée à partir de la représentation de ces différents éléments constitutifs. Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

#### **2.2.2. Critères de vulnérabilité spécifique**

- **Comportement du polluant potentiel** (milieu fixe) : selon leur nature, les polluants se comportent dans le milieu de manière spécifique. Ce comportement dépend des caractéristiques du milieu, mais également des propriétés physico-chimiques du composé lui-même. Les principaux phénomènes susceptibles d'intervenir sont géochimiques (réactions acides-bases, d'oxydoréduction, de désorption,...), biochimiques (biodégradation, synthèse cellulaire,...), physiques (diffusion, évaporation, filtration,...), ou biophysiques (transport de germes,...).
- **Capacités dispersives et épuratoires des sols** : face à un polluant donné, les sols ont des propriétés épuratoires plus ou moins développées et spécifiques de ce polluant.
- **Intrusions marines** (présence ou non de biseau salé) : dans le cas de la présence d'un biseau salé en équilibre avec une nappe d'eau souterraine, la salinisation de la nappe liée à une surexploitation constitue une pollution potentielle.
- **Qualité du réseau hydrographique** : dans le cas où il alimente les eaux souterraines, et selon son extension, sa vulnérabilité et la qualité de ses eaux, le réseau hydrographique peut être vecteur de contaminations vers les eaux souterraines.
- **Typologie de l'occupation du sol** : l'occupation du sol conditionne les volumes et la nature des polluants potentiels. Elle peut être de type naturel (forêt/nature) ou agricole (cultures, élevage) ou urbain (habitat, tissu industriel, etc....).
- **Points sensibles** : sur certains sites, de par l'activité à risque qui y est pratiquée, la vulnérabilité de la nappe est augmentée significativement. Ce sont les surfaces agricoles, les décharges (aux normes ou non), les rejets des

établissements classés, les voies de circulation, les prélèvements dans la nappe (modifiant ou non localement les écoulements et favorisant localement les transferts surface/nappe).

Les critères de vulnérabilité cités ci-dessus associés aux ensembles souterrains dans lesquels ils interviennent sont récapitulés dans le Tableau 1.

VULNERABILITE INTRINSEQUE			VULNERABILITE SPECIFIQUE
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée	
Ruissellement – infiltration	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe ; libre ou captive	Occupation du sol : forêt/espaces naturels, agriculture/culture (l'irrigation augmente la percolation, le drainage la diminue), urbanisation/tissu industriel
Pédologie ; perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols	Temps de transfert ; perméabilité verticale	Temps de résidence dépend des paramètres hydrodynamiques des formations aquifères Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Présence ou non de biseau salé
	Structure de la ZNS ; variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en m.o. et argile	Relation eaux souterraines/eaux superficielles	Points sensibles ; surfaces agricoles, décharges, rejets des établissements classés, densité des voies de circulation, prélèvements dans la nappe
		Piézométrie : évolution des sens et direction d'écoulement selon la période du cycle hydrologique	Capacités dispersives et épuratoires des sols face à un polluant spécifique
		Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)	Comportement du polluant potentiel (milieu fixe) ; soluble, insoluble, miscible, non miscible, plus dense, plus léger que l'eau, réactivité avec le milieu traversé
		Type de système hydrogéologiques : caractères plus ou moins capacitif et transmissif	Réseau hydrographique ; extension et vulnérabilité (qualité des cours d'eau)
		Direction et sens d'écoulement	
Battement de nappe			
Recharge : quantité d'eau atteignant la ZS sur une période donnée (recharge annuelle nette).			
Fracturation, directions et densité			

**Tableau 1 : Critères de vulnérabilité couramment pris en compte**

## 2.3. LES METHODES DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES

### 2.3.1. Généralités

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998 b).

Elles peuvent être classées en trois grandes catégories :

- **Les méthodes de cartographies à index** basés sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple) ;
- **Les modèles de simulation** : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen 2002). Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe ;
- **Les méthodes statistiques** : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude. Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

Les méthodes de cartographie à index comportent deux types d'approche : les systèmes hiérarchisés et les systèmes paramétrés. (N. Schnebelen et al., 2002)

- La méthode des systèmes hiérarchisés est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones (autres bassins ou autres systèmes aquifères). Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrogéologiques variés à moyenne ou grande échelle (régionale ou nationale) ;
- La méthode des systèmes paramétrés repose sur la sélection de paramètres (ou critères) considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination. Les systèmes paramétrés peuvent être classés en trois principaux groupes : systèmes matriciels, systèmes indexés et méthodes de pondération et d'indexation des paramètres. Chacun est adapté à un objectif différent : respectivement, petite échelle d'étude, échelle moyenne d'étude, mais non prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité, échelle moyenne d'étude et prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité.

Les **méthodes de cartographie à index avec pondération des critères** (Point Count Systems Models, PCSM) sont les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994).

Ce type de méthode est également le plus adapté à la problématique guadeloupéenne du fait de l'échelle de travail retenue (1/25 000) et des degrés divers d'influence des paramètres du milieu sur la vulnérabilité des nappes.

Différentes méthodes ont été développées, testées notamment à l'échelle européenne (exemple de l'action européenne COST620 concernant la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique des aquifères fissurés carbonatés) voire même normalisées ; les principales sont présentées ci-dessous.

### 2.3.2. Méthodes

Les deux premières méthodes présentées sont spécifiques du milieu karstique « en grand », elles sont citées pour mémoire car le milieu qui nous concerne est de type poreux/fracturé.

#### **EPIK**

C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques *sensus-stricto* (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997).

Elle a été développée dans le but de délimiter les périmètres de protection des captages, conformément à la législation suisse, à partir d'une base cohérente et rigoureuse. Un des avantages de cette méthode est de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis à vis de tout type de contaminant.

La méthode est systématique puisqu'elle propose une analyse détaillée du bassin d'alimentation de la source karstique découpé en un maillage régulier. Elle est basée sur quatre critères :

- Epikarst ;
- Protective Cover (couverture protectrice : sol) ;
- Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ;
- Karst network development (développement du réseau karstique).

Ces critères correspondent à quatre aspects spécifiques déterminant l'organisation des écoulements en milieu karstique. Chaque paramètre est divisé en classes traduisant des degrés d'impact vis à vis d'une pollution. Un coefficient multiplicateur (facteur de pondération) est appliqué à chaque paramètre afin de traduire son importance relative par rapport aux autres (Petelet-Giraud *et al.*, 2000).

L'indice final de vulnérabilité est calculé (facteur de protection) en chaque maille du système selon la formule :  $F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  : coefficients de pondération des critères ;  
 $E_i, P_j, I_k, K_l$  : valeur de chacun des critères indexés.

La gamme de variation du facteur de protection F est divisée en quatre classes correspondant à des zones de protection visant à répondre aux impératifs de la réglementation helvétique en matière de protection des points d'eau pour l'alimentation en eau potable.

## **RISKE**

Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst (Petelet-Giraud *et al.*, 2000).

La combinaison des 5 cartes correspondant à la transcription des 5 critères RISKE permet de calculer l'indice global de vulnérabilité (Ig) en chaque maille de la zone d'étude. Le choix de la taille de la maille se fait généralement en fonction du pas du Modèle Numérique de Terrain (50 x 50 m par exemple) ou de la densité de l'information disponible. A chaque maille correspond une valeur de l'indice de chacun des critères. La compilation des cinq cartes élémentaires se fait en introduisant un facteur de pondération entre les critères traduisant l'importance relative qui leur est attribuée. Cette étape est largement facilitée par l'utilisation d'un Système d'Information Géographique. Dans le cadre de la méthode RISKE, le logiciel IDRISI® v32.02 (Clark-Labs, 2000) pour Windows sous Pc a été retenu pour ses grandes capacités et sa facilité d'utilisation. Le calcul de l'indice global de vulnérabilité Ig se fait selon la formule :

$$I_g = \alpha R_i + \beta I_j + \delta S_k + \gamma K_l + \varepsilon E_m$$

$\alpha, \beta, \delta, \gamma, \varepsilon$  : poids des critères RISKE ;  
 $i, j, k, l, m$  : indices des critères RISKE.

Toutes les alternatives des critères sont classées en 5 catégories indexées de 0 à 4, du moins au plus vulnérable. Dans la même logique, l'indice global de vulnérabilité (Ig) obtenu en chaque pixel de la zone d'étude est divisé en 5 classes égales (0 à 4) allant du moins au plus vulnérable.

La carte finale de vulnérabilité représente donc les zones appartenant à une même classe de vulnérabilité par le même code couleur (couleur claires à foncées pour représenter les zones de vulnérabilité faible à très forte).

## **GOD**

Ce système a été développé par Foster en 1987, il est illustré par la Figure 1. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

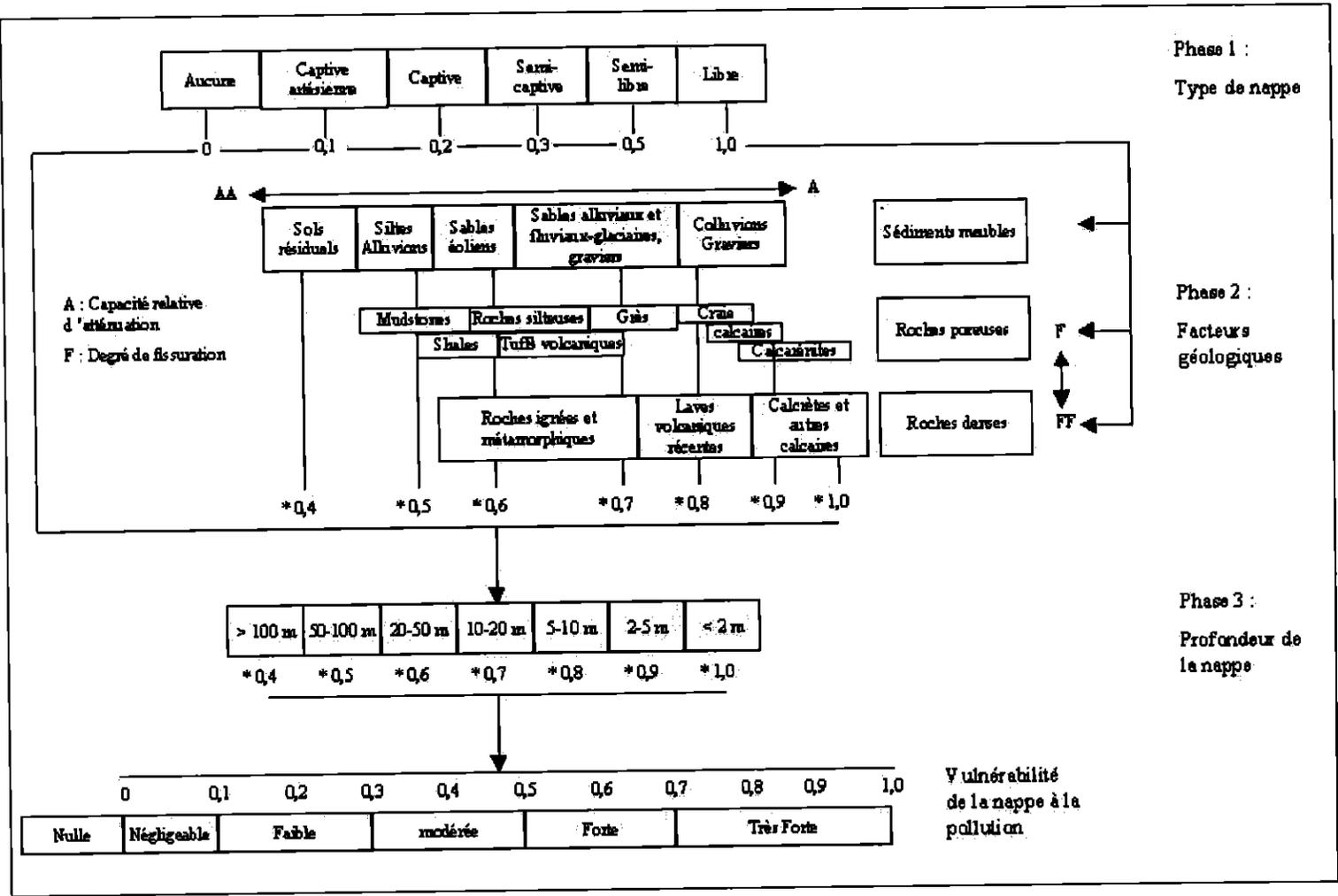


Figure 1 : Système empirique GOD ; pour une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (d'après Foster, 1987).

## **DRASTIC**

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller *et al.* en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schnebelen *et al.*, 2002). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères :

- D : Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ;
- R : Recharge (recharge) ;
- A : Aquifer media (nature de la zone saturée) ;
- S : Soil media (nature du sol) ;
- T : Topographie (topographie, pente en %) ;
- I : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ;
- C : Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final ( $D_i$ ) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$$D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

Où D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut

$n$  : notation accordée à chaque paramètre ;

$p$  : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index.

Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le Tableau 2. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

<b>D : DISTANCE A LA NAPPE, EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATUREE</b>		<b>R : RECHARGE (PLUIE EFFICACE)</b>	
Valeurs en mètres	Notation	Valeurs en mm	Notation
0 - 1,5	10	> 25,5	9
1,5 - 4,5	9	17,5 - 25,5	8
4,5 - 9	7	10 - 17,5	6
9 - 15	5	5 - 10	3
15 - 22	3	0 - 5	1
22,5 - 30	2		
> 30	1		

<b>A : NATURE DE LA ZONE SATUREE</b>		<b>S : NATURE DU SOL</b>	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats ou pentes	7
Grès massif	6	Limon sableux	6
Shales en séquence	6	Limon	5
Métamorphique altéré, grès lités, calcaires	4	Limon silteux	4
Métamorphique	3	Limon argileux	3
Shale massif	2	Argile non agrégée et non fissurée	1

<b>T : TOPOGRAPHIE, PENTES</b>		<b>I : NATURE DE LA ZONE NON SATUREE</b>	
Valeurs en % de pente	Notation		
0 - 2	10	Calcaire karstique	10
2 - 6	9	Basalte	9
6 - 12	5	Sable et gravier	8
12 - 18	3	Sable et gravier avec silt et argile	6
> 18	1	Calcaire lité, grès, shale	6
		Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/Argile	1

<b>C : PERMEABILITE</b>	
> 9,4. 10 <sup>-4</sup> m/s	10
4,7.10 <sup>-4</sup> - 9,4.10 <sup>-4</sup> m/s	8
32,9.10 <sup>-5</sup> - 4,7.10 <sup>-4</sup> m/s	6
14,7.10 <sup>-5</sup> - 32,9.10 <sup>-5</sup> m/s	4
4,7.10 <sup>-5</sup> - 14,7.10 <sup>-5</sup> m/s	2
4,7.10 <sup>-7</sup> - 4,7. 10 <sup>-5</sup> m/s	1

**Tableau 2 : Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994).**

La méthode DRASTIC propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'occupation du sol (Tableau 3) : occupation "normale" ou avec une occupation par une activité agricole intensive utilisant par exemple des produits phytosanitaires.

CRITERES	FACTEURS DE PONDERATION	
	"NORMAL"	"PRODUITS PHYTO"
D : Profondeur	5	5
R : Recharge	4	4
A : Milieu aquifère (zone saturée)	3	3
S : Milieu sol au-dessus de la zone non saturée	2	5
T : Topographie	1	3
I : Nature de la zone non saturée	5	4
C : Perméabilité aquifère	3	2

**Tableau 3 : Facteurs de pondération des différents critères de la méthode DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994).**

## SINTACS

La méthode SINTACS est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Pételet *et al.*, 2000).

Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

- S : Soggiacenza (profondeur de la nappe) ;
- I : Infiltrazione (infiltration) ;
- N : Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée) ;
- T : Tipologia della Copertura (sol) ;
- A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristique hydrogéologiques de l'aquifère) ;
- C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- S : Acclività della Superficie Topographica (pente moyenne de la surface topographique).

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des facteurs de pondération variables selon les situations (Schnebelen *et al.*, 2002). L'index de vulnérabilité  $I_v$  est calculé selon la formule :

$$I_v = \sum P_{(1,7)} W_{(1,n)}$$

Avec :  $P_{(1,7)}$  : index des critères 1 à 7

$W_{(1,n)}$  : poids de chaque classe (varie de 1 à n)

L'index final résultant de cette méthode est divisé sous forme de pourcentage puis d'intervalles définis sur la base de 500 tests. Ces intervalles sont regroupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les sept même paramètres que DRASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération. L'utilisateur code

les données d'entrée en fonction des situations locales de chaque cellule, avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions.

### Autres méthodes

- Z. Alamy et C. Langevin (1989) procèdent à une analyse détaillée de la couverture de sol (Lallemand-Barrès, 1994).

Les facteurs et critères retenus par ces auteurs, ainsi que la notation et le poids attribués aux critères sont résumés dans le Tableau 4. On peut constater que la pondération des critères est très subjective.

Paramètres	Classes				Poids
	0 - 5 % (5)	5 - 10 % (2)	10 - 15 % (1)	> 15 % (1)	
Pente	0 - 5 % (5)	5 - 10 % (2)	10 - 15 % (1)	> 15 % (1)	1/2
Épaisseur couverture	< 5 m (1)	5 - 2 m (3)	2 - 1 m (5)	< 1 m (5)	-
Perméabilité couverture ou de l'affleurement	> 10 <sup>-4</sup> (25)	> 10 <sup>-4</sup> .10 <sup>-6</sup> (5)	10 <sup>-6</sup> .10 <sup>-9</sup> (3)	10 <sup>-9</sup> (2)	1
Perméabilité sous-sol non saturé	> 10 <sup>-4</sup> (25)	> 10 <sup>-4</sup> .10 <sup>-6</sup> (5)	10 <sup>-4</sup> .10 <sup>-9</sup> (3)	< 10 <sup>-9</sup> (2)	1
Hydromorphie	sans (5)	temporaire (3)	temporaire (2)	permanente (1)	1/3
Profondeur nappe	> 20 m (1)	5 - 20 m (3)	1 - 5 m (5)	< 1 m (25)	1/2
Nature couverture	sable (3)	gravier (5)	argile sableuse limon (2)	argile (1)	-
Fracturation	sans (1)	1 direction proche (3)	2 directions proches (5)	champ (25)	-
Densité de fracturation	(1)	(3)	(5)	(25)	-

Tableau 4 : Paramètres valeur et poids retenus pour l'élaboration d'une carte de vulnérabilité (Alamy, Langevin, 1989).

- Dans le cadre d'une application à la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais), J. Ricour (1988) propose les paramètres suivants comme critères pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité : nature du recouvrement sur l'aquifère crayeux, topographie et profondeur de la nappe sous le sol (Tableau 5).

Cette carte de vulnérabilité est superposée à des facteurs à caractère évolutif ayant trait à l'occupation des sols pour constituer une carte de sensibilité aux risques de pollution (Lallemand-Barrès, 1994).

Carte de vulnérabilité	Paramètre	Poids global	--- Echelle de vulnérabilité croissante et poids relatif de chaque paramètre → +			
	Lithologie et recouvrement	1	Argile sur craie	Alluvions sur craie	Limons sur craie	Craie en affleurement
Topographie	0,5	Pente > 10 %	5 < pente ≤ 10 %	1 < pente ≤ 5 %	pente ≤ 1 %	
		0	1	2	3	
Profondeur du niveau sous le sol	0,5	profondeur > 30 m	15 < profondeur ≤ 30 m	5 < profondeur ≤ 15 m	profondeur ≤ 5 m	
		1	2	3	4	
Zone fracturée	1	Zone linéamentaire susceptible de correspondre à des zones fracturées				
Carte de sensibilité	Typologie de l'occupation du sol (urbanisation, routes, forêts...)	Superposition par classe à la carte de vulnérabilité	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
			forêts, friches	milieu agricole et marécageux	milieu urbain et industriel, routes, carrières, décharges...	

Tableau 5 : Paramètres pris en compte dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité et de sensibilité du milieu souterrain aux risques de pollution (Ricour, 1988).

- S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991), pour élaborer les cartes de vulnérabilité au Guatemala, retiennent les paramètres présentés dans le Tableau 6.

Largeur	Variables Paramètres	Echelle de vulnérabilité et poids relatif de chaque paramètre										Poids Global					
		(Très vulnérable)				(Peu vulnérable)											
Zone non saturée	Epaisseur	< 10 m		10-20 m		20-30 m		30-50 m		> 50 m		5					
			Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 5	Initiale 3	Finale 15	Initiale 10	Finale 50	Initiale 25	Finale 125		Initiale 50	Finale 250			
Zone de recharge	Type de milieu	de recharge				hors zone de recharge				urbain		3					
		Initiale		Finale		Initiale		Finale		Initiale			Finale				
	Valeur attribuée	1		3		10		30		25		75					
Densité de drainage	Degré de perméabilité	très perméable		perméable		semi-perméable		ruisselant		très ruisselant		2					
		Initiale		Finale		Initiale		Finale		Initiale			Finale				
	Valeur attribuée	1		2		3		6		10		20		25		50	
Fracturation	Niveau probable de fracturation	très fracturé				peu fracturé						1					
		Initiale		Finale		Initiale		Finale		Initiale			Finale				
	Valeur attribuée	1		1		25		25									

Tableau 6 : Paramètres pris en compte dans l'élaboration de la carte de vulnérabilité (valeur finale = valeur initiale \* poids global) (Munoz, Langevin, 1991).

- Dans l'étude de M.F. Suais (1990) où les critères de vulnérabilité sont assimilés aux critères d'évaluation des risques de pollution, on peut retenir la proposition de nouveaux critères relatifs aux sols, qui sont des critères non plus stables, mais variables dans le temps ou par intervention humaine, tels que degré d'imperméabilisation, densité et nature du couvert végétal et densité de drainage (Figure 2).

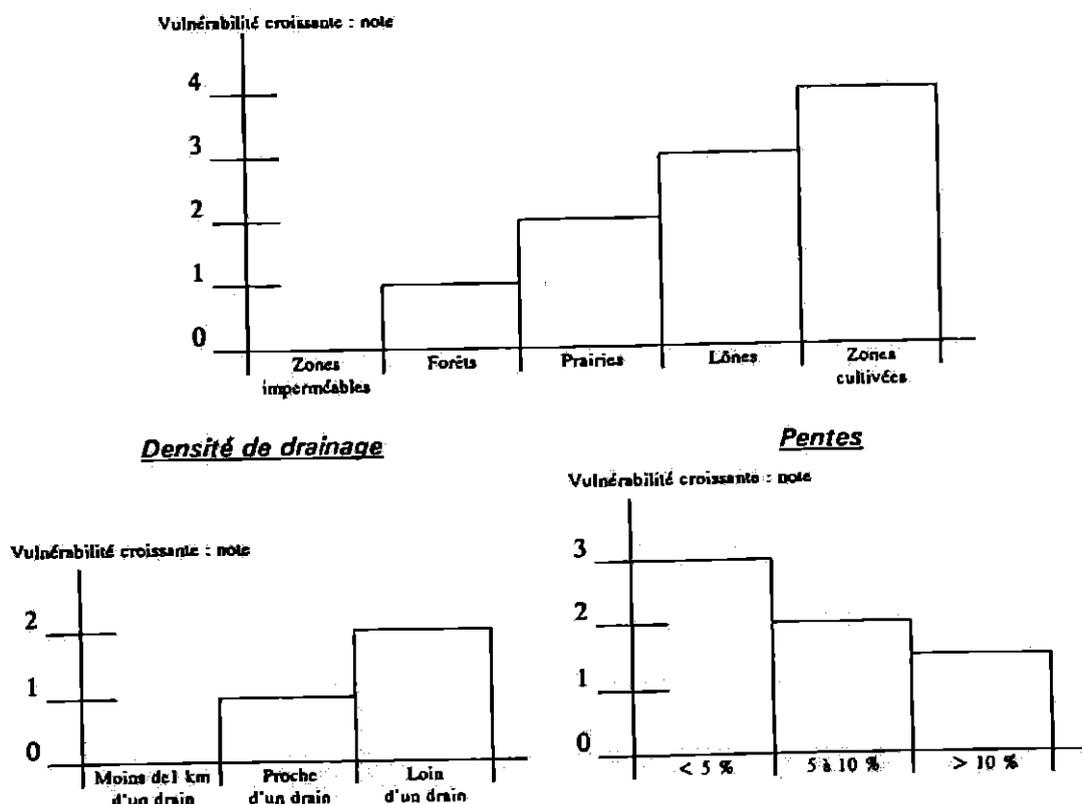


Figure 2 : Critères relatifs à la surface du sol (M.F. Suais et al., 1990)

Des critiques sont souvent émises concernant les méthodes de pondération et d'indexation des paramètres. Par exemple une des limites de la méthode DRASTIC serait le trop grand nombre de critères (7) pris en compte, ce qui implique que l'influence d'un paramètre particulièrement important pour une certaine thématique peut être "masqué" par les autres paramètres pris en compte.

### 2.3.3. Conclusion

D'autres méthodes de cartographie de la vulnérabilité ont été développés dans un but d'établir une méthode d'établissement des périmètres de protection (exemple méthode EPIK et méthode DISCO (guide pratique en préparation, OFEFP 2002, Suisse). Cette dernière méthode est spécifique au milieu fissuré; elle prend en considération trois types de paramètres : les paramètres de discontinuité (failles, discontinuités lithologiques mises en évidence à partir des cartes géologiques, photos aériennes et relevés de terrain), les paramètres relatifs à la couverture protectrice et les paramètres de type ruissellement.

La difficulté dans l'élaboration de ces méthodes réside essentiellement dans le choix des critères, leur notation, et le poids qu'on leur attribue, et aussi dans le fait de retenir des critères qui sont le plus indépendants les uns des autres. Il est difficile d'établir une méthode universelle de cartographie multicritère car chaque cas d'étude est particulier et un paramètre important dans un cas le sera peut être beaucoup moins dans un autre (Schnebelen et al., 2002).

Un critère n'est pas une échelle de mesure universelle, il est propre à chaque décideur. La validation d'une telle démarche de cartographie de la vulnérabilité, peut passer par la mise sur pieds d'un réseau qualité d'un certain nombre de points, outil de gestion complémentaire de la ressource en eau souterraine.

### **3. Contexte naturel des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante**

La vulnérabilité des eaux souterraines est fonction des conditions du milieu et de son comportement vis à vis des polluants. La définition de la méthode de cartographie et le choix de critères de vulnérabilités spécifiques des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante repose donc sur la connaissance du contexte naturel de ces deux îles.

#### **3.1. CADRE GEOGRAPHIQUE**

##### **3.1.1. Grande-Terre**

###### ***Paysages***

L'île de Grande-Terre s'étend sur 556 km<sup>2</sup>. Elle comporte trois grands types de paysages :

- la région dite des Grands-Fonds (sud-ouest de l'île) est la plus accidentée : elle culmine à 135 m d'altitude au Morne l'Escale. Le paysage y est marqué par un enchevêtrement de collines de faibles altitudes (ou mornes) séparées par des vallées sèches.
- les paysages du Nord et de l'Est se caractérisent par de grandes étendues quasi-plates et occupées principalement par les cultures de canne à sucre.
- la région centrale dite Plaine des Grippons est plate et occupée par des cultures maraîchères.

###### ***Occupation humaine***

La Grande-Terre est très urbanisée dans la région de Pointe-à-Pitre (Sous-Préfecture) et de son agglomération qui concentrent les activités tertiaires et constituent le pôle économique de la Guadeloupe avec la zone industrielle de Jarry (Commune de Baie Mahault) et la riviera (zone hôtelière) du Gosier à Saint-François.

L'agglomération de Pointe à Pitre / Abymes regroupe plus du tiers de la population de l'archipel : un habitant sur six vit dans la ville des Abymes, la plus peuplée de Guadeloupe.

Le reste de l'île est peu urbanisé et rural (culture de la canne à sucre et de la banane).

### **3.1.2. Marie-Galante**

#### **Paysages**

L'île de Marie-Galante a une superficie de 158 km<sup>2</sup>, elle se divise en deux grands secteurs géographiques :

- un secteur surélevé dans le centre et l'Est de l'île. Point culminant à 200 m à Mabouya ;
- un secteur abaissé dans le Nord.

Le paysage est marqué par une falaise qui traverse l'île d'est en ouest c'est la "Barre de l'île"

La frange littorale est plus ou moins large sur le pourtour ouest et sud de l'île.

#### **Occupation humaine**

L'île est divisée en 3 communes : Grand-Bourg, Saint-Louis et Capesterre de Marie-Galante. L'habitat est concentré dans les 3 bourgs principaux et éparpillé dans le reste de l'île (avec des sections où l'habitat est plus concentré). L'activité principale est la culture de la canne (3 distilleries) et le tourisme.

## **3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE**

Les îles de Grande-Terre et Marie-Galante sont toutes deux constituées de formations sédimentaires carbonatées.

### **3.2.1. Grande-Terre**

L'île de Grande-Terre correspond à une vaste plate-forme carbonatée d'âge Plio-Pléistocène (1 à 5 millions d'années), reposant très vraisemblablement sur un substratum volcanique d'âge miocène (qui n'a jamais été recoupé en forage).

Les plus anciens dépôts connus sont des calcaires riches en foraminifères planctoniques du Pliocène inférieur, au-dessus desquels s'est déposée la série carbonatée plio-pléistocène épaisse de 120 m, à laquelle appartiennent tous les terrains affleurants de la Grande-Terre.

Cette série est composée de 90 m de calcaires de plate-forme à nodules alguaire (rhodolites), bioclastes divers et foraminifères benthiques dits « calcaires inférieurs ». Des niveaux volcano-sédimentaires, parfois épais de près d'une dizaine de mètres, s'intercalent au sommet de la série.

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, permettant ainsi la karstification et la dolomitisation des calcaires à rhodolites.

Les calcaires à rhodolites ont été brutalement remplacés au Pléistocène inférieur par des calcaires à polypiers parfois récifaux, constituant les 30 derniers mètres de la série et dits « calcaires supérieurs ».

Le soulèvement de l'île au Pléistocène inférieur a entraîné l'émersion définitive de sa partie SW (Grands-Fonds) qui a été affectée d'une fracturation de direction N 130° E.

Au quaternaire, l'émersion de la Grande-Terre s'est poursuivie de façon plus homogène par le soulèvement et le basculement vers l'WNW de l'ensemble des plateaux. Cette deuxième phase d'émersion a entraîné l'apparition d'une fracturation N 40° E qui, combinée aux fractures N 130° E précédentes forme le complexe réseau d'accidents qui débite la Grande-Terre.

Une coupe type de la série lithologique de Grande-Terre est présentée en Figure 3.  
Une carte morphologique illustrant le réseau de fracturation majeure de l'île est présentée en Figure 4.

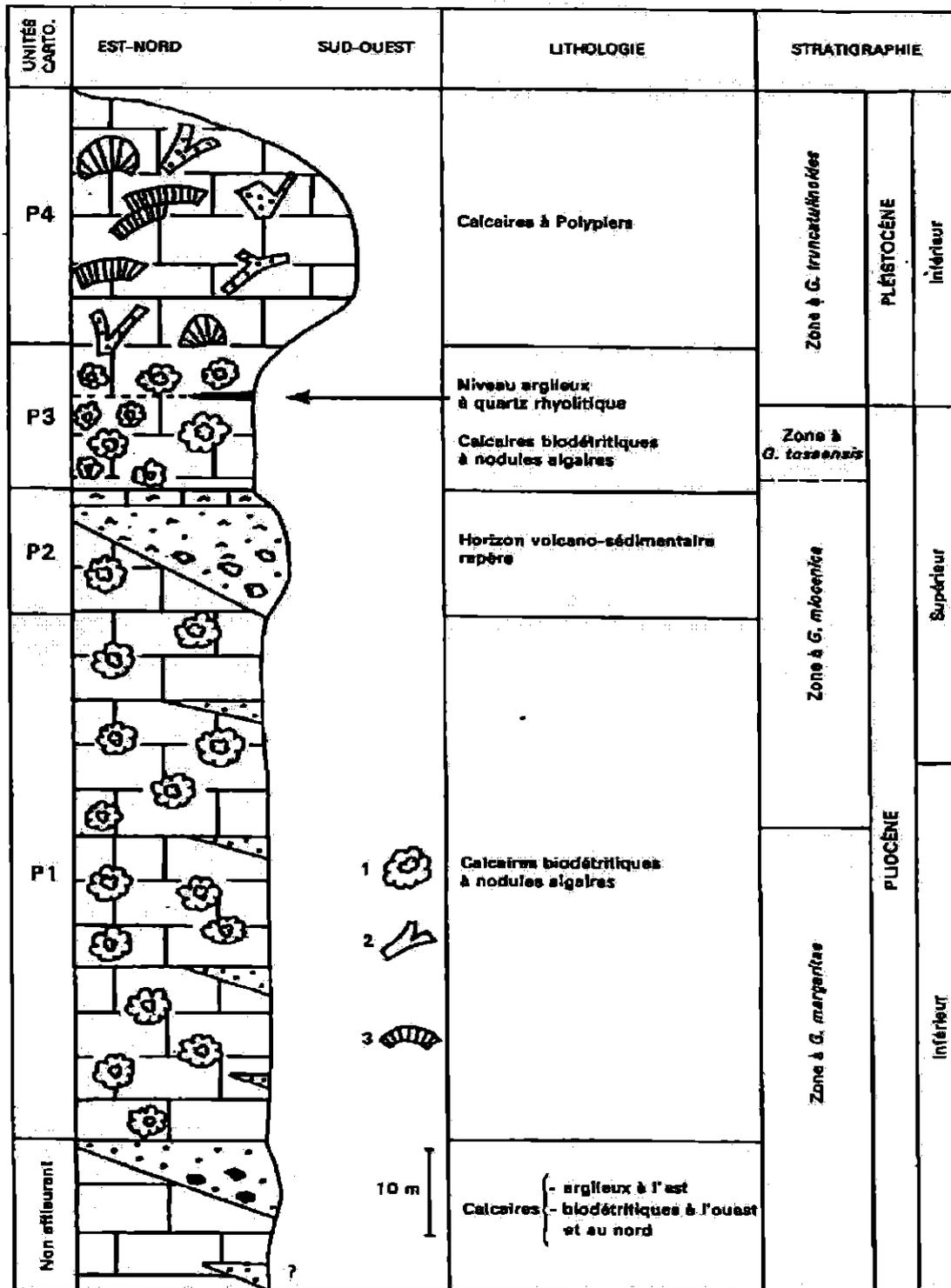


Figure 3 : Coupe schématique de la série plio-pléistocène de la Grande-Terre. 1. Nodules algaires 2. Polypiers branchus 3. Polypiers massifs (d'après Garrabe et Andreieff, 1988)

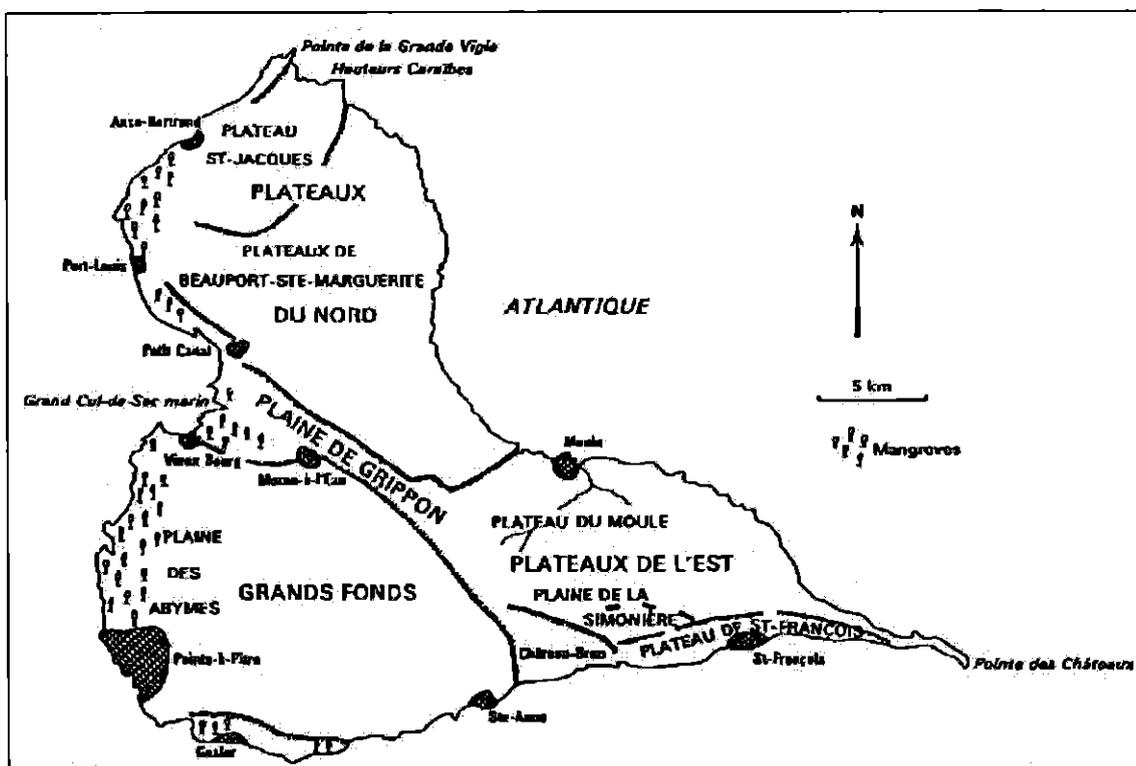


Figure 4 : Toponymie et morphologie de la Grande-Terre (d'après GARRABE et ANDREIEFF, 1988).

### 3.2.2. Marie-Galante

Comme l'île de Grande-Terre, Marie-Galante est composée essentiellement de formations sédimentaires carbonatées plio-pléistocènes. La série carbonatée a une puissance d'environ 230 m et présente des intercalations de niveaux à éléments volcaniques (volcanoclastes argilisés fréquents dans l'ensemble de la série). Son substratum est connu, il s'agit de formations volcano-sédimentaires recoupées en forages.

Les calcaires à rhodolites constituent l'essentiel des affleurements de l'île.

L'île a subi une tectonique plio-quadernaire importante avec basculement général vers l'ouest ou le sud-ouest, et une tectonique cassante ayant conduit à la formation d'un escarpement, la "barre de l'île", consécutif à l'affaissement d'un compartiment nord. Marie-Galante est donc découpée en deux blocs structuraux principaux, séparés par la "barre de l'île" dont le dénivelé peut atteindre 130 m.

La région nord dite "les Bas", est basculée vers l'ouest-nord-ouest. Elle est recoupée par plusieurs failles secondaires.

Le compartiment sud, surélevé, appelé les Hauts, a été basculé vers le sud-ouest. La fracturation la moins intense correspond au compartiment des Bas et au plateau de Robert ; la plus intense, à la région des mornes occidentaux.

Une carte morphologique illustrant le réseau de fracturation majeure de l'île de Marie-Galante est présentée en Figure 5.



Figure 5 : Esquisse morphologique et toponymie de Marie-Galante échelle 1/100 000 (Gervaise et Milville, 1999)

### 3.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

#### 3.3.1. Grande-Terre

##### **Unités hydrogéologiques**

Les ensembles calcaires dits "calcaires supérieurs", et "calcaires inférieurs" (Figure 3) forment deux réservoirs carbonatés superposés et séparés par un niveau repère volcano-sédimentaire peu perméable.

Une nappe occupe l'ensemble de l'île; elle est divisée en quatre unités hydrogéologiques correspondant aux grandes unités morphostructurales présentées en Figure 4, soit : les plateaux du Nord, les plateaux de l'Est, la plaine de Grippon et les Grands-Fonds.

Les calcaires supérieurs constituent l'aquifère principal des trois premières unités et le niveau volcano-sédimentaire repère son substratum.

Les calcaires inférieurs constituent l'aquifère principal des Grands-Fonds. Celui-ci est libre dans la partie centrale de l'unité où le niveau volcano-sédimentaire sus-jacent est peu épais et se situe au-dessus du niveau piézométrique libre de la nappe. Dans la partie occidentale de l'unité, le niveau volcano-sédimentaire s'enfonce sous la Plaine des Abymes et atteint son épaisseur maximale ; la nappe devient captive.

##### **Alimentation**

L'alimentation de cette nappe est assurée uniquement par les eaux météoritiques. Les précipitations en Grande-Terre sont en moyenne comprises entre 1000 et 2000 mm/an et présentent une variabilité intersaisonnière très marquée (saison sèche : carême ; saison des pluies : hivernage).

La recharge moyenne annuelle est estimée entre 200 et 300 mm mais peut être nulle certaines années. La ressource renouvelable a été estimée par modélisation hydrodynamique en régime permanent à 60 millions de m<sup>3</sup> par an pour toute la Grande-Terre.

##### **Fonctionnement hydrodynamique**

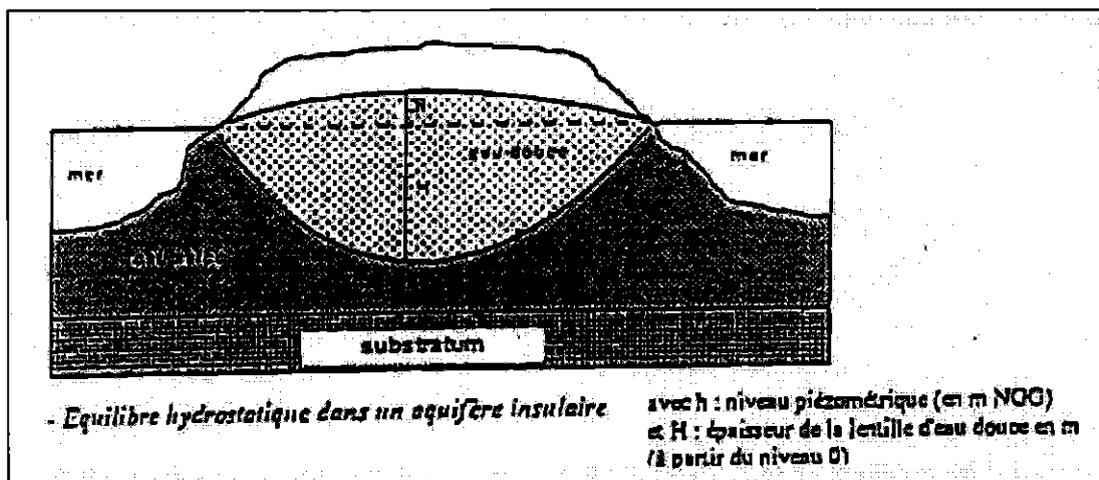
La nappe de Grande-Terre se caractérise par une géométrie radiale comportant :

- un dôme piézométrique d'axe est-ouest centré sur la partie orientale des Grands-Fonds et la moitié occidentale des Plateaux de l'Est. Il à environ 10 m NGG. Il présente en direction du sud et du nord-est un gradient élevé qui contraste avec la pente de la nappe vers l'ouest et le nord-est.
- une plaine piézométrique caractérisée par une surface relativement plate et basse, souvent inférieure à 2 m NGG, qui s'étend sur la totalité des Plateaux du Nord. Cette zone est délimitée au Sud par la Plaine de Grippon qui constitue un axe de drainage orienté SE-NW en accord avec la présence du fossé tectonique de même orientation.

Les mangroves de l'ouest de l'île sont des zones d'émergence de la nappe.

### **Biseau salé**

La nappe de Grande-Terre est en équilibre hydrostatique avec les eaux marines selon le principe exposé en Figure 6.



**Figure 6 : Coupe schématique de l'aquifère de Grande-Terre.**

Cet état de fait implique un risque de pénétration d'eau marine dans la nappe, soit à la faveur de zones favorables à la circulation (zones de fractures), soit au droit de site en surexploitation.

Dans certains secteurs, la nappe est en équilibre direct avec l'eau de mer, c'est le cas pour les Plateaux du Nord, et l'extrême Est des Plateaux de l'Est. La nappe y est quasiment plate et le niveau piézométrique maximum est voisin de 1 m NGG, ce qui leur confère une sensibilité élevée.

Dans l'unité de la Plaine des Grippons et la partie occidentale des Plateaux de l'Est, la nappe est protégée d'éventuelles remontées d'eau salée par la présence du niveau volcano-sédimentaire au-dessus de l'interface eau douce- eau salée.

Dans l'unité des Grands Fonds, la nappe est contenue dans les calcaires inférieurs et est en équilibre avec l'eau salée, mais sa puissance lui confère une protection importante.

### **Exploitation**

Ces eaux souterraines sont essentiellement exploitées pour la production d'eau potable, mais également d'eau agricole et industrielle. Les quatre unités hydrogéologiques participent à cette production à hauteur 53% de la production totale AEP pour les Grands-Fonds, 32% pour les Plateaux du Nord, 12% pour la Plaine de Grippon et 3 % pour les Plateaux de l'Est 3% (données 2001).

Les volumes prélevés annuellement pour la production d'eau potable atteignent 4,25 millions de m<sup>3</sup> répartis en 15 points de prélèvement.

### **Qualité**

La minéralisation est conditionnée par la structure hydrogéologique de l'île :

- faciès chloruré-sodique dans les secteurs où la nappe est en équilibre direct avec l'eau salée (Plateaux du Nord et extrême est de l'île) ;
- faciès bicarbonaté-calcique dans le reste de l'île.

Pour évaluer le degré de qualité de l'eau de la nappe, deux paramètres sont généralement retenus en Guadeloupe : les teneurs en nitrates (des teneurs élevées dans

la nappe correspondent le plus souvent à une infiltration d'engrais azotés) et les teneurs en chlorures : leur présence en quantité importante dans la nappe est associée à une intrusion d'eau salée souvent liée à une sur exploitation de la nappe.

Les derniers contrôles de la qualité des eaux (2001) ont montré que :

- la nappe est particulièrement exposée au risque d'intrusion du biseau salé dans le nord Grande-Terre qui est une zone de concentration de points de prélèvement. La salinisation de la nappe est observée dans ce secteur sur trois forages exploités pour la distribution d'eau potable ;
- une pollution azotée de la nappe est amorcée, particulièrement dans les secteurs du nord Grande-Terre et de la Plaine des Grippons.

### 3.3.2. Marie-Galante

#### ***Unités hydrogéologiques et fonctionnement hydrodynamique***

La nappe de Marie-Galante est une nappe libre, contenue dans les calcaires récifaux et sub-récifaux du Plio-quatenaire dans lesquels s'intercalent des niveaux d'argile d'épaisseurs variables.

La tectonique conditionne fortement le fonctionnement de cet aquifère par la présence de failles, d'effondrements et du basculement des couches. Plusieurs secteurs peuvent être distingués en fonction de leurs caractéristiques hydrodynamiques : la faille Anse-Piton – Vieux Fort ("Barre de l'île") qui individualise le compartiment nord "des Bas" du compartiment sud "des Hauts".

- unité des Bas : la nappe est contenue dans les calcaires supérieurs et son substratum est constitué par le niveau volcano-sédimentaire repère. S'agissant d'un compartiment effondré, le substratum est profond et la nappe est en équilibre hydrostatique direct avec les eaux marines. La perméabilité y est en général forte ( $>3.10^{-4}$  m/s) ;
- unité des Hauts : cette unité peut être redécoupée en sous unités en fonction des caractéristiques hydrodynamiques des formations, de la profondeur du biseau salé et de la position du substratum volcano-sédimentaire :
  - Zone des Hauts – partie orientale : caractéristiques hydrodynamiques moyennes, mais puissance de la nappe importante et substratum au-dessus de l'interface eau douce / eau salée ;
  - Zone des Hauts – Plateau de Pirogue – rivière Saint-Louis : nappe plus productive de puissance importante et substratum au-dessus de l'interface eau douce / eau salée ;
  - Marais de Saint-Louis et Mornes occidentaux : caractéristiques hydrodynamiques bonnes, mais présence du biseau salé à faible profondeur ;
  - Pourtour sud de l'île : la zone de contact entre l'eau de la nappe et l'eau salée limite les possibilités d'exploitation.

La zone des Hauts constitue un dôme piézométrique et l'écoulement de la nappe est radial ; depuis le centre de l'île vers la mer. Le secteur des Sources (ouest de l'île, vallée de la rivière Saint-Louis) correspond à une zone d'émergence de la nappe.

Une karstification existe en profondeur, mais son degré d'évolution n'influence pas significativement l'écoulement de la nappe.

Un schéma illustrant le fonctionnement hydrodynamique de l'île est présenté en Figure 7.

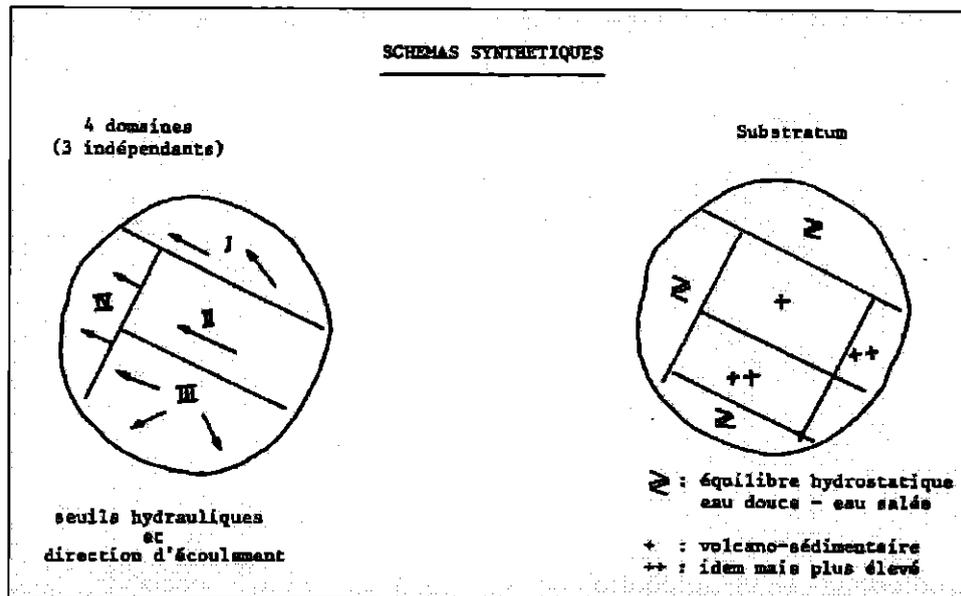


Figure 7 : Schémas synthétiques de l'hydrodynamisme de Marie-Galante (Pointet, 1983).

### Alimentation

La nappe est alimentée par infiltration d'eau météorique, préférentiellement dans la zone "des Hauts".

Les précipitations à Marie-Galante sont moins abondantes qu'en Grande-Terre, elles s'élèvent à 1 000 - 1 500 mm par an.

La partie la plus arrosée correspond au secteur est et la partie la plus sèche à la région de Grand-Bourg, dans le sud-ouest.

### Exploitation

Les eaux souterraines de Marie-Galante constituent la seule ressource en eau de l'île et sont exploitées essentiellement pour la production d'eau potable par le biais de sept forages répartis dans le compartiment des Hauts.

La production atteint 1,03 millions de m<sup>3</sup> par an.

### Qualité

La composition chimique de l'eau de la nappe évolue du faciès bicarbonaté calcique dans le centre de l'île vers un faciès chloruré sodique à l'interface avec l'eau salée.

Certains ouvrages trop profonds et trop sollicités présentent un faciès chimique intermédiaire, indiquant un mélange.

Aucune pollution par les nitrates n'est observée à Marie-Galante.

## 4. Vulnérabilité des eaux souterraines de Grande-Terre et Marie-Galante

Dans un premier temps il est proposé de s'attacher à cartographier la vulnérabilité intrinsèque des nappes de Grande-Terre et Marie-Galante en se basant sur les caractéristiques du milieu physique en relation avec la nappe (critères invariables dans le temps).

Cependant, un critère de vulnérabilité spécifique (biseau salé) majeur dans le contexte insulaire sera également pris en compte ; il s'agit de la présence d'un biseau salé sur le pourtour des îles de Grande-Terre et de Marie-Galante.

### 4.1. LES CRITERES DE VULNERABILITES

Pour rendre compte de la vulnérabilité intrinsèque des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante, sept critères sont proposés. Ils ont été identifiés à partir de l'analyse du contexte hydrogéologiques des îles, ils sont représentatifs des facteurs du transfert de substances depuis la surface vers les nappes guadeloupéennes.

Un paramètre de vulnérabilité spécifique a également été retenu pour tenir compte du contexte insulaire guadeloupéen.

Les critères proposés sont présentés dans le Tableau 7.

VULNERABILITE INTRINSEQUE			VULNERABILITE SPECIFIQUE
Sol	Zone Non Saturée	Zone Saturée	
Pédologie	Epaisseur	Type de nappe	Biseau salé
Ruissellement - recharge	Perméabilité		
Fracturation			
Points sensibles			

**Tableau 7 : Critères de vulnérabilité intrinsèque et spécifique proposés pour les nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante**

Classiquement les études de vulnérabilité retiennent un nombre de critères compris entre 5 et 10. Trop peu de critères ne permettent pas un aperçu complet de la vulnérabilité. En revanche un trop grand nombre de critères aura tendance à atténuer la vulnérabilité finale, du fait de la trop grande quantité de données superposées.

#### 4.1.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque

- Ruissellement – recharge : prise en compte des cours d'eau temporaires et pérennes et des facteurs ruissellement et infiltration préférentiels comme représentatifs de la recharge par la méthode des indices de persistance des réseaux .

Les données de topographie sont disponibles dans le Modèle Numérique de Terrain de la Guadeloupe (au pas de 50 m). Les données relatives au réseau hydrographique sont disponibles dans le SIG inter-services de Guadeloupe.

- Couverture pédologique (nature et épaisseur) : la nature des sols (qui contrôle leur perméabilité) et leur épaisseur sont les deux facteurs qui conditionnent le caractère épurateur et l'aptitude des sols à laisser s'infiltrer une pollution éventuelle. Il s'agit d'un critère déterminant pour la vulnérabilité des eaux souterraines.
- Type de nappe (nappe libre / nappe captive) : dans le contexte guadeloupéen, c'est la présence ou l'absence du niveau volcano-sédimentaire (considéré comme peu perméable) ainsi que sa position qui conditionnent la nature de la nappe (nappe libre / nappe captive) et son degré de protection vis à vis des infiltrations.
- Profondeur de la nappe ou épaisseur de la Zone Non Saturée : ce critère est pris en compte dans toutes les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des nappes qui ont été développées. Il est fondamental pour appréhender le temps de transfert d'une pollution jusqu'à la nappe ainsi que la possibilité pour cette pollution d'être traitée en cours de transfert. Elle est obtenue par la différence entre la surface topographique et la cote piézométrique maximum de la nappe (afin de considérer en tous points l'épaisseur minimale de la ZNS). La nappe est d'autant plus vulnérable que l'épaisseur de la ZNS est faible (ou que la profondeur de la nappe est faible) ;
- Nature lithologique et perméabilité de la ZNS : paramètres fondamentaux de la vulnérabilité des eaux souterraines, ces deux critères peuvent être représentés conjointement. En effet, le nombre de données disponibles en Grande-Terre et à Marie-Galante ne permet pas d'établir une carte précise des variations de perméabilité. En revanche, la prise en compte du caractère plus ou moins perméable propre à la nature lithologique des formations permet d'appréhender les variations spatiales de perméabilité.
- Fracturation – discontinuités : les failles guadeloupéennes sont considérées comme des lieux privilégiés d'infiltration et de circulation de fluides. Elles sont cartographiées sur la carte géologique au 1/50 000.
- Points d'infiltration préférentiels liés à des caractéristiques morphologiques particulières (dolines) ou à l'activité humaine (carrières et forages) :
  - Dolines : les dolines sont de petites dépressions fermées associées à des phénomènes localisés de karstification qui concentrent les écoulements de surface. Le fond de la doline est en relation avec le milieu souterrain, il peut être plus ou moins colmaté par de l'argile de décalcification, ce qui conditionne la perméabilité de la doline. D'une façon générale, elles devront être considérées comme perméables, car le recouvrement argileux peut être amené à disparaître. Elles concentrent donc les écoulements superficiels et sont en relation quasi-directe avec le milieu souterrain.
  - Carrières : de nombreuses carrières d'extraction de "tuf" sont ou ont été en exploitation en Grande-Terre. Au même titre que les dolines, elles constituent des lieux de convergence des écoulements superficiels. Par ailleurs, le calcaire étant mis à nu, l'infiltration y est favorisée.
  - Forages et puits : les sites de prélèvements d'eau sont considérés comme points de concentration de la pollution par rabattement de la nappe lors

d'un pompage et/ou comme points d'émission de pollution dans le cas d'un rejet de polluant dans un ouvrage ancien.

#### 4.1.2. Vulnérabilité spécifique

- Biseau salé : sur tout le pourtour des îles de Grande-Terre et Marie-Galante ainsi que dans certains secteurs favorables à son intrusion on observe la présence d'un biseau salé susceptible d'être mobilisé par pompage en cas de surexploitation de la nappe (ce phénomène est actuellement observé en Guadeloupe). Il s'agit d'un critère de vulnérabilité spécifique des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante mais il constitue un paramètre à prendre en compte pour la gestion des nappes et sa représentation sur la carte de vulnérabilité est incontournable en contexte insulaire.

Le risque de mobilisation du biseau salé est directement lié à la profondeur de l'interface eau douce/eau salée ; il peut être appréhendé de façon directe ou indirecte soit :

- à partir de données existantes et par calcul sur la base de la piézométrie des nappes ;
- à partir de données recueillies au cours d'une campagne de mesures spécifique.

#### 4.1.3. Prise en compte du risque

Dans le souci de construire une carte de vulnérabilité d'utilisation pratique pour les gestionnaires de l'eau et renseignée sur l'aléa pollution, il sera utile de faire figurer sur la carte de vulnérabilité les principaux sites susceptibles d'émettre une pollution (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement).

### 4.2. METHODE DE DETERMINATION DE LA VULNERABILITE DES NAPPES DE GRANDE-TERRE ET DE MARIE-GALANTE

La méthode de définition de la vulnérabilité proposée pour les nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante est une méthode de cartographie à index avec pondération des critères de type DRASTIC (les critères de vulnérabilités propres aux nappes de Guadeloupe sont sensiblement les mêmes que ceux utilisés par Aller et al., mis à part le type de nappe, la fracturation, les points sensibles et le biseau salé).

L'échelle de cartographie retenue est le 1/25 000.

La cartographie de chaque critère sera réalisée en mode raster et la taille des mailles sera choisi pour approcher au plus près la répartition spatiale des données (50 m).

La construction des cartes de vulnérabilité comprend différentes étapes :

- **recueil des données relatives à chaque critère** : cette étape est l'objet de la phase 2 du projet de cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante. Elle comprend le recueil de données "bibliographiques" ou déjà existantes dans des bases de données et l'acquisition de données complémentaires par mesures ou observations sur le terrain.

- **rassemblement des données en classes et indexation des classes** : la variabilité dans l'espace des critères de vulnérabilité est caractérisée par le découpage des critères en classes. Chaque classe étant ensuite affectée d'un index représentatif de son degré de vulnérabilité (note faible pour la moins vulnérable, note élevée pour la plus vulnérable). La classification et l'indexation ne pourront être définies qu'après le recueil des données.
- **cartographie de chaque critère** : sept cartes rendant compte de la vulnérabilité des nappes vis à vis de chaque critère seront réalisées ; le découpage des critères en classes y sera représenté et l'indexation des classes sera restituée en utilisant la symbolique de couleur habituelle : couleurs chaudes (rouge - orangé) pour indiquer le danger donc la forte vulnérabilité et couleurs froides (vert - bleu) dans le cas contraire.

Une carte de représentation du biseau salé (cartes d'isovaleurs de la profondeur de l'interface eau douce – eau salée) sera également présentée.

- **pondération des critères** : certains critères ayant une influence plus forte que d'autres sur la vulnérabilité de la nappe chaque critère sera pondéré afin de rendre compte de leur importance relative en terme de vulnérabilité (poids fort pour les critères les plus sensibles, poids faibles pour les critères moins importants).

Propositions de pondération :

- Proposition 1 :

(le poids rattaché à chaque critère varie de 1 à 4, 1 étant l'indice de vulnérabilité le plus faible)

Ruissellement - recharge	2
Couverture pédologique	2
Type de nappe	3
Profondeur de nappe	4
Lithologie – perméabilité de la ZNS	3
Fracturation	2
Points sensibles	1

- Proposition 2 :

(le poids rattaché à chaque critère varie de 1 à 5, 1 étant l'indice de vulnérabilité le plus faible)

Ruissellement Recharge	3
Couverture pédologique	2
Type de nappe	2
Profondeur de nappe	5
Lithologie – perméabilité de la ZNS	3
Fracturation	4
Points sensibles	4

- **réalisation de la carte de vulnérabilité générale** : une carte de vulnérabilité intrinsèque sera réalisée à partir de la superposition pondérée des cartes de critères de vulnérabilité intrinsèque.

La carte de zonage du biseau salé ainsi que la localisation des installations à risque seront superposées à cette carte de vulnérabilité intrinsèque (mais n'interviendront pas dans la corrélation pondérée des critères précédents).

Des Système d'Information Géographique (SIG) seront utilisés pour réaliser l'ensemble des cartes.

La représentation cartographique générale suivra la même symbolique que les cartes de critères.

## **5. Conclusion**

Ce rapport, rend compte des investigations menées par le BRGM pour définir des critères et une méthode de cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante au 1/25 000. Elles aboutissent à la proposition de 7 critères de vulnérabilité intrinsèque, d'un critère de vulnérabilité spécifique adapté au contexte et d'une méthode de cartographie à index avec pondération des critères.

Ces résultats seront présentés et soumis à l'approbation du comité de pilotage de l'étude (DIREN-DAF-BRGM).

Les facteurs de pondération proposés sont susceptibles de changer lors de la réalisation finale de la carte de vulnérabilité. En effet, ils dépendent de la quantité et de la qualité des données qui seront recueillies dans les phases suivantes de l'étude : une carte réalisée à partir d'informations nombreuses et précises aura toujours un poids supérieur à une carte réalisée à partir de données disparates et de qualité discutable.

## 6. Bibliographie

ALLER L., BENNET T., LEHR J.H., PETTY R.J. et HACKETT G. 1987 – DRASTIC : a standardized system for evaluating groundwater pollution potentiel using hydrogeological settings. US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455 pp.

BEZELGUES S. et DOUGAPARSAD M., mai 2002. – Suivi piézométrique des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe), compte rendu des données acquises en 2001 – BRGM/RP 51 445 FR.

BRAUX C. 1996 – Cartographie multicritère : guide méthodologique – Rapport BRGM R 39146, 71 p, 25 fig.

BRGM/NPC – Cartographie SIG de la vulnérabilité des eaux souterraines de la craie dans le bassin Artois-Picardie – Numéro de fiche : 02EAU 269.

BRGM/SGN, février 1996 – Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des eaux souterraines – Rapport BRGM R 38846.

BRGM/SGR Rhône-Alpes, novembre 1994 – Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution et du risque de propagation de la pollution dans les nappes. Feuille de Lyon à 1/50.000. Actualisation des données et cartographie multicritères – Rapport BRGM R 37 929 SGR/RHA 94.

CLARK-LABS, 2000 – IDRISI : GIS and Image Processing. v32.02. Windows PC. Clark University. Worcester, USA.

DOERFLIGER N. 1996 – Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Neuchâtel, Suisse, 292 pp.

DOERFLIGER N., and ZWAHLEN F, 1997 – EPIK, méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques pour la délimitation des zones de protection. 12<sup>th</sup> *International Congress of Speleology*. Suisse. 2, 209-212.

FOSTER S.S.D., 1987 – Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy – Vulnerability of soil and Groundwater to pollutants. RIVM. TNO Comittee on Hydrological Research, pp. 69-86.

GARRABE F., ANDREIEFF P., 1988 – Carte géologique à 1/50 000 de la Grande-Terre, Guadeloupe. Notice explicative.

GERVAISE C. et MILVILLE F., juillet 1999. – Renforcement de la production en eau potable de Marie-Galante (Guadeloupe), Synthèse des données hydrogéologiques de l'île, Etude de l'implantation d'un ou deux forages de reconnaissance – N° A 17010.

GOGU R., and DASSARGUES A. 1998b – A short overview on groundwater vulnerability assessment (basic statements for use in the framework of the COST 620 Action). *Workshop : Vulnérabilité et protection des eaux karstiques*. Neuchâtel (Suisse).

GOGU R., and DASSARGUES A. 2000 – Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39(6), 549-559.

GRAILLAT A. et BOUCHET C., avec la collaboration de DURAND F., PAULIN Ch., PETIT V., PICQUET I. et SEDAN O. Janvier 1994 – Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe de la Grande-Terre. Coupure IGN 4603 G de Pointe-à-Pitre échelle 1/25 000 – Rapport BRGM R 37 896 ANT 4S 94 C 420 00802.

LALLEMAND-BARRES A., 1994 – Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Etude documentaire préliminaire. Rapport BRGM R 37928.

LYAKHLOUFI S., ER-ROUANE S., OUZZANI N. et EL HEBIL A.E., 1999 – Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe phréatique du Haouz de Marrakech (Maroc). *Hydrogéologie*, 3, 43-52.

MARDHEL V. 2001 – Evaluation et cartographie de la vulnérabilité des grands aquifères de l'île de la Réunion – Etude de l'aquifère de la plaine des Galets (rive droite de la rivière des Galets). Rapport BRGM/RP-50590-FR – 00 SGR/REU 40, 98 p., 62 fig., 4 tabl., 1 annexe.

MARGAT J., novembre 1968 – Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de sa cartographie – Rapport BRGM 68 SGL 198 HYD.

MUNOZ., LANGEVIN C., 1991 – Adaptation d'une méthode cartographique assistée à l'élaboration de cartes de vulnérabilité au Guatemala. *Hydrogéologie*, n°1.

MUNOZ-JUAREZS.R. 1989 – Essai d'adaptation d'une méthode de cartographie assistée à l'élaboration de cartes de vulnérabilité au Guatemala. *DEA Paris-Sud Orsay*.

PAULIN Ch., mai 1993 – Synthèse des connaissances sur les eaux souterraines de la Guadeloupe au 1<sup>er</sup> janvier 1992 – R 36 334 ANT 4S92 C 42000946

PETELET-GIRAUD E<sup>1</sup>. DOERFLIGER N<sup>2</sup>. CROCHET P<sup>3</sup>. 2000 – RISKE : Méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Application aux systèmes des Fontanilles et Cents-Fonts (Hérault, S. France) – Soumis à *Hydrogéologie*, 2000, 1 et 3 ANTEA Montpellier, 2 BRGM Montpellier.

PLATEL J.P., SCHNEBELEN N., LE NINDRE Y., SOURISSEAU B., avec la collaboration de SAPLAIROLES M., DUFOUR P., BENHAMMOUDA S., BONERY  
Rapport BRGM R 51783

H. 2000 – Gestion des eaux souterraines en Aquitaine – Année 4 – Etude sectorielle – Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Synthèse des connaissances géologiques. Etat des connaissances hydrogéologiques. Rapport BRGM/RP-50468-FR 70 p., 36 figures, 5 cartes annexes.

POINTET T. et SCHWARTZ J., 1983 – Ile de Marie-Galante bilan des écoulements souterrains simulation en régime permanent. Rapport BRGM 83 SGN 493 EAU.

RICOUR J., 5 décembre 1988 – Elaboration de cartes de vulnérabilité et de sensibilité à la pollution de la nappe de la craie dans le secteur de Guînes (Pas-de-Calais) à l'aide du logiciel SYNERGIE. Essai méthodologique - Rapport BRGM 88 NPC 101.

RICOUR J., novembre 1991 – Risque de pollution des eaux souterraines par les transports routiers. Première phase : définition des concepts et choix des paramètres à prendre en compte dans un traitement cartographique multicritère – Rapport BRGM R 33219 NPC 4S 91.

SAATY T.L., 1977 – A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, 15, 234-281.

SCHNEBELEN N., PLATEL J.P., LE NINDRE Y., et BAUDRY D., *avec la collaboration de* HOARAU A., DUFOUR P. et BENHAMMOUDA S. 2002 – Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise – Rapport BRGM/RP-51178-FR.

SINAN M., TROUILLARD J.M., 1993 – Utilisation de la cartographie multicritère pour l'étude de la vulnérabilité des aquifères. Application au Sud du bassin hydrogéologique de l'Essonne – Première phase : sélection et acquisition des données. Rapport BRGM R 37211, 41 p., 17 fig., 2 ann.

SUAIS M.F., VINATIER J.M., BARAT A. 1990 – Vulnérabilité des aquifères. Recherche de critères cartographiques pertinents. Rapport BRGM R30890 RHA 4S90.

ZAPOROZEC A., and VRBA J., 1994 – Classification and review of groundwater and vulnerability maps. *In* : VRBA J., and ZAPOROZEC (Editors), Guidebook on mapping Groundwater vulnerability. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp.21-19.

**BRGM**  
**Service Géologique Régional de Guadeloupe**  
Rue des Finances – 97139 Abymes – Tel. 0590 21 75 00