

**Evaluation de la vulnérabilité
intrinsèque des eaux souterraines
de la Martinique**

Rapport final

BRGM/RP-56283-FR
Juin 2008

Juin 2008

Document public

Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique

Rapport final

BRGM/RP-56283-FR

Juin 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2006 EAU D20

D. Allier, B. Vittecoq, V. Mardhel

Vérificateur :

Nom : E. Putot

Date : 28 mars 2008

Signature :

Approbateur :

Nom : JP. Comte

Date : 14 avril 2008

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

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



Mots clés : Vulnérabilité intrinsèque, eaux souterraines, Martinique, masse d'eau souterraine, SIG, IDPR, DOM, SIGES

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

Allier D, Vittecoq B. Mardhel V. (2008) Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique. BRGM/RP-56283-FR.

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La Région, la DIREN et le BRGM ont engagé un programme d'évaluation au niveau régional des ressources en eau souterraine de la Martinique. Par délibération n° 04-1964 en date du 09 novembre 2004, la Région Martinique a convenu de se porter maître d'ouvrage d'un programme d'étude portant sur l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine de la Martinique, mis en œuvre par le BRGM.

L'objectif du présent rapport est de contribuer à améliorer significativement **l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de la qualité des eaux souterraines de la Martinique**, et de la porter à connaissance en vue de la mise en valeur des eaux souterraines.

L'analyse cartographique menée dans cette étude permet de traiter les différentes bases de données disponibles sur l'ensemble du territoire à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) sous ArcGis® et de contribuer ainsi, à améliorer la connaissance de la vulnérabilité des eaux souterraines.

L'analyse de la vulnérabilité intrinsèque des premiers aquifères rencontrés a été menée sur la combinaison de trois critères : l'indice de développement et persistance des réseaux (IDPR), le type de nappe et l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS). La méthode de l'IDPR apparaît tout à fait adaptée à la réalisation de cartes de vulnérabilité intrinsèque en milieu volcanique.

Les résultats sont présentés sous forme cartographique, avec une fiche par masse d'eau. Globalement, on constate qu'environ la moitié des unités fonctionnelles présentent une vulnérabilité moyenne, qu'un quart présentent une vulnérabilité forte et un quart une vulnérabilité faible.

Cette carte de vulnérabilité a ainsi vocation à devenir un véritable outil d'aide à la gestion et à la surveillance de la ressource en eau souterraine.

Le critère le moins connu étant l'épaisseur de la zone non saturée, cette cartographie pourra être mise à jour dès lors que suffisamment de nouveaux forages auront été réalisés dans les secteurs où cette information fait défaut.

Sommaire

1. Introduction	9
2. La vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines : définitions et méthodologie	11
2.1. NOTIONS DE VULNERABILITE.....	11
2.1.1. Vulnérabilité intrinsèque	11
2.1.2. Vulnérabilité et risque	12
2.2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE.....	13
2.2.1. Les méthodes de cartographie à index	13
2.2.2. Critères de vulnérabilité intrinsèque	15
2.2.3. Méthode basée sur l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux	17
3. Calcul de l'Indice de Développement et de Persistance de Réseaux	19
3.1. DEFINITION.....	19
3.2. DONNEES NECESSAIRES.....	20
3.3. RESEAU HYDROLOGIQUE NATUREL	21
3.4. RESEAU THEORIQUE ISSU DU RELIEF.....	23
3.4.1. Pré-traitement du MNT – zones de dépression	24
3.4.2. Prise en compte de la pluviométrie	24
3.4.3. Réseaux de talwegs calculés	27
3.5. CALCUL DE L'IDPR	29
3.6. REPRESENTATION PAR UNITES FONCTIONNELLES.....	31
4. Hiérarchisation de l'épaisseur de la zone non saturée	35
4.1. PROFONDEUR DE LA NAPPE.....	35
4.2. CARTOGRAPHIE DE L'EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATUREE	36
5. Cartographie de l'indice de vulnérabilité	41

5.1. PONDERATION DE L'IDPR EN FONCTION DU TYPE DE NAPPE	41
5.2. PONDERATION DU CRITERE IDPR EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE ZONE NON SATUREE	44
5.3. CARTE DE VULNERABILITE	45
5.4. SIG	47
6. Conclusion.....	49
7. Bibliographie	51

Liste des figures

Figure 1: Schéma simplifié du fonctionnement d'un hydrosystème	12
Figure 2: Réseau hydrographique calculé selon les lignes de plus grande pente, sur fond MNT ©BDTOPO	19
Figure 3: Réseau hydrologique naturel extrait de la BD TOPO® Pays de l'IGN	22
Figure 4: Pluviométrie moyenne annuelle en Martinique (1915-2006) en mm/an (source : MétéoFrance, juin 2006).....	25
Figure 5 : Résultat du calcul de pluie efficace (BRGM/RP - 55099 - FR)	26
Figure 6: Réseaux de talwegs calculés	28
Figure 7: Résultat du calcul de l'IDPR sur la totalité de la région. Les zones rouges et bleues indiquent respectivement les zones infiltrantes et ruisselantes.....	30
Figure 8 : Définition d'unités fonctionnelles	32
Figure 9 : Valeur de l'IDPR par unités fonctionnelles	33
Figure 10: Définition de la zone non saturée Source : http://geology.er.usgs.gov/eespteam/brass/ground/groundintro.htm	35
Figure 11 : Définition de la zone non saturée. (Hydrogéologie, Castany, 2000)	36
Figure 12: Localisation des données disponibles sur fond IGN ©BDTOPO	37
Figure 13 : Hiérarchisation de l'épaisseur de la ZNS.....	39
Figure 14 : Valeurs normées du critère IDPR selon la nature de la nappe d'eau souterraine	42
Figure 15 : Critère IDPR affecté aux unités fonctionnelles.....	43
Figure 16: Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines	48

Liste des tableaux

Tableau 1: Tour d'horizon des méthodes de vulnérabilités	14
Tableau 2 : Critères de vulnérabilité	17
Tableau 3 : Valeurs de l'IDPR.....	29
Tableau 4 : pondération du critère IDPR en fonction de la ZNS.....	44

Liste des annexes

Annexe 1 Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères.....	55
Annexe 2 Corrélations entre la forme du réseau hydrographique et les formations géologiques.....	67
Annexe 3 Fiches par masses d'eau	71

1. Introduction

Ce projet s'inscrit dans le cadre général de l'élaboration du « Système d'Information Régional sur les ressources en eau souterraine de la Martinique » dont les objectifs sont :

- de contribuer à améliorer significativement la **connaissance régionale patrimoniale des ressources en eau souterraine**, nécessaire pour leur protection, leur valorisation et leur suivi dans le cadre d'une gestion durable et respectueuse de l'environnement, conformément aux orientations du SDAGE,
- de s'inscrire dans le cadre du plan d'action pour répondre à la Directive Cadre Européenne en matière de caractérisation des ressources en eau souterraine
- de porter à connaissance les résultats synthétisés au niveau régional, de façon à ce qu'ils puissent être utilisés dans les projets spécifiques de mise en valeur ou de protection des eaux souterraines

En effet, des situations de crises saisonnières apparaissent de plus en plus fréquemment en Martinique du fait du manque de ressource en eau destinée à l'Alimentation en Eau Potable (AEP), notamment en période de carême sec. Du fait de l'augmentation prévisible de la demande (démographie, développement social et économique), ces situations risquent de s'amplifier dans les années à venir. Actuellement 92% de l'eau utilisée proviennent d'eau de surface (le reste provenant de sources). Pourtant, du fait de leurs caractéristiques qualitatives, de leur généralement bonne protection naturelle et de leur proximité des zones de consommation, les eaux souterraines constituent un complément intéressant aux eaux de surface.

Ces ressources en eau souterraine pourraient être exploitées sous réserve d'une bonne appréciation des disponibilités quantitatives, qualitatives et des impacts de cette exploitation.

La Région, la DIREN et le BRGM ont ainsi engagé un programme d'évaluation au niveau régional des ressources en eau souterraine de la Martinique. Par délibération n° 04-1964 en date du 09 novembre 2004, la Région Martinique a convenu de se porter maître d'ouvrage d'un programme d'étude portant sur l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine de la Martinique, mis en œuvre par le BRGM.

L'objectif du présent rapport est de contribuer à améliorer significativement **l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de la qualité des eaux souterraines de la Martinique**, et de la porter à connaissance en vue de leur mise en valeur.

2. La vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines : définitions et méthodologie

2.1. NOTIONS DE VULNERABILITE

2.1.1. Vulnérabilité intrinsèque

La **vulnérabilité** est le « défaut de protection ou de défense naturelle de l'eau souterraine contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales » (définition retenue par le Comité National Français des Sciences Hydrologiques).

Autrement dit, la vulnérabilité est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent *la sensibilité des eaux souterraines à la pollution*. Elle décrit la vitesse de propagation d'un polluant vers et dans la nappe d'eau souterraine et caractérise la capacité de «protection» d'une nappe vis-à-vis d'une pollution.

La pollution de l'eau souterraine est une altération qui la rend impropre à une de ses utilisations ou perturbe l'écosystème aquatique, elle peut être provoquée par différentes sources comme l'utilisation de produits phytosanitaires (insecticide, herbicide, fongicide), les engrais (azotés, etc.), les accidents industriels (fuite de cuve, incendie, etc.) ou routiers (vidange de la cargaison d'un camion), les fuites des réseaux d'égouts, les décharges sauvages de déchets domestiques ou industriels, etc.....

Les polluants susceptibles d'atteindre la nappe sont ainsi de nature diverse et ont des comportements très différents lors de leur migration dans le sol et le sous-sol. La mobilité et la persistance des substances dans le sous-sol sont très variées selon leur solubilité, leur facilité à être biodégradées, etc. Ces mécanismes très complexes dépendent non seulement de la nature des polluants mais aussi des conditions de pH, de l'activité microbiologique, de l'humidité et de la teneur en matière organique des sols,... La prise en compte de la nature des polluants dans la cartographie de la vulnérabilité supposerait donc de dresser de nombreuses cartes, prenant en compte les spécificités liées aux différentes espèces. De fait, nous utiliserons la notion de **vulnérabilité intrinsèque** qui contrairement à la vulnérabilité spécifique, est indépendante du polluant.

La vulnérabilité intrinsèque décrit en effet la **susceptibilité** de la ressource en eau souterraine, **à être affectée par une pollution de surface**, diffuse ou ponctuelle. Croisée avec des informations sur les activités humaines (industrielles, urbaines, agricoles), elle pourra donc permettre d'évaluer **le risque de pollution auquel la nappe est soumise**.

En outre, la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps (à notre échelle de travail) alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

La vulnérabilité intrinsèque traduit en fait **la capacité du premier réservoir souterrain à recevoir les eaux issues de la surface**. Le transfert de ces eaux issues de la surface dans le sol s'effectue d'abord à travers la zone non saturée (ZNS) avant d'atteindre la zone saturée. La ZNS est la zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre. Elle représente la zone d'infiltration de l'aquifère (cf. Figure 1)

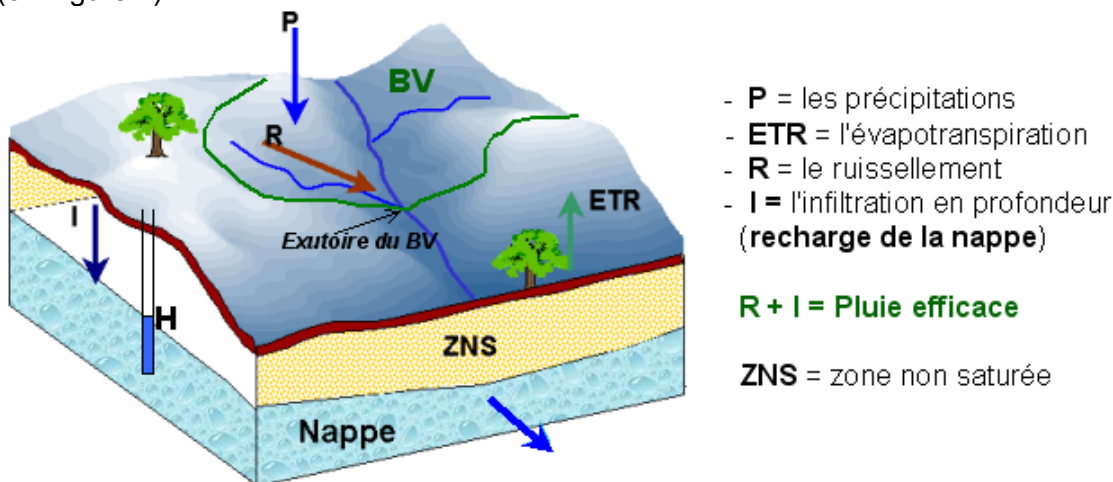


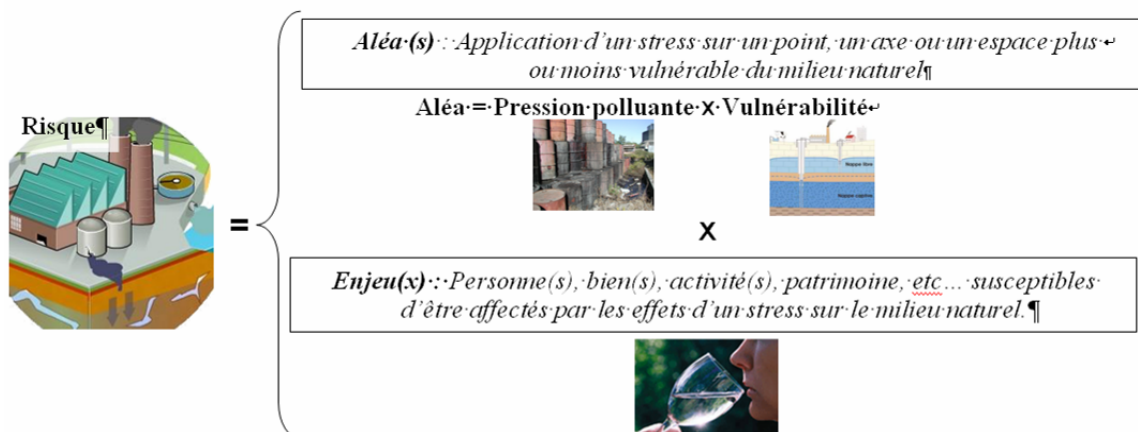
Figure 1: Schéma simplifié du fonctionnement d'un hydrosystème

2.1.2. Vulnérabilité et risque

La notion de vulnérabilité est différente de la notion de risque. Un aquifère peut être vulnérable mais en l'absence de pressions industrielles ou agricoles ne pas être atteint par une pollution. Autrement dit, la notion de vulnérabilité ne dépend que des seules conditions physiographiques et hydrogéologiques du milieu, elle n'inclut pas le degré d'exposition aux risques de pollution.

On rappelle que le risque est la probabilité qu'un effet indésirable se réalise dans des conditions d'exposition données. Ce n'est pas tant la présence de polluants (exemple : fuite d'hydrocarbures provenant de cuves) qui pose problème mais le fait que cette pollution soit mobilisable (exemple : propagation rapide du polluant vers la nappe libre non protégée) et donc qu'elle risque de porter préjudice à des enjeux (exemple : captage pour l'alimentation en eau potable).

Ainsi le risque découlant de l'aléa, de l'enjeu et de la vulnérabilité donnés en exemple est l'altération du captage pour l'alimentation en eau potable voire son arrêt (eau rendue impropre à la consommation) par l'arrivée d'un polluant au sein de l'aquifère.



La cartographie d'un risque, pour un polluant ou une famille de polluants, nécessite le croisement :

- d'une carte de vulnérabilité,
- d'une carte des enjeux,
- d'une carte des pressions.

Le risque d'intrusion d'eau salée, inhérent au milieu insulaire ne sera pas traité dans ce présent rapport. Celui-ci n'est en effet que l'effet induit par un surpompage. Il sera abordé dans le rapport BRGM/RP-56266-Fr, caractérisation et différenciation géochimique des eaux souterraines de la Martinique.

2.2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

2.2.1. Les méthodes de cartographie à index

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). Ce sont ces dernières méthodes dites « de cartographies à index » qui sont le plus souvent utilisées, considérées comme les plus pertinentes vis-à-vis des réalités de terrains. Elles sont basées 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).

Différentes méthodes développées et normalisées sont présentées en annexe 1, elles sont détaillées dans l'annexe 4 du rapport public BRGM/RP-55332-FR (<http://www.brgm.fr>)- Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie. VERNOUX.J.F., WUILLEUMIER.A., SEGUIN.J.J., DORFLIGER.N., MARTIN.A., 2007.

Tableau 1: Tour d'horizon des méthodes de vulnérabilités

DRASTIC	7 critères : D epth to groundwater, R echarge, A aquifer media, S oil media, T opographie, I mpact of the vadose zone, C onductivity	Développée par l'EPA (Environmental Protection Agency) en 1985 et Aller <i>et al.</i> en 1987. Utilisée pour la cartographie à petite échelle
SINTACS	7 critères (cf. DRASTIC)	Dérivée de la méthode DRASTIC, 1990, utilisée pour une cartographie à moyenne et grande échelle
AVI (Aquifer Vulnerability Index)	2 critères : Epaisseur et conductivité hydrauliques de chaque couche sédimentaire	Développé par National Hydrology Research Institute Echelle régionale
EPIK	4 critères : E pikarst, P rotective Cover, I nfiltration Conditions, K arst network development	Développée par Doerfliger en 1996 puis Doerfliger et Zwahlen, en 1997. Destinée aux aquifères karstiques.
RISKE	5 critères : R oche aquifère, I nfiltration, S ol, K arstification, E pikarst	Dérivée de EPIK, pour les aquifères karstiques .
DISCO	3 paramètres : D iscontinuités, C ouverture protectrice, R uissellement	Développée pour définir des zones de protection.
GOD	3 critères: G roundwater occurrence ; O verall aquifer class, D epth to groundwater table	Développée par Foster en 1987. Ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée.
Autres	<ul style="list-style-type: none"> - Z. Alamy et C. Langevin (1989) - J. Ricour (1988) - S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991) - M.F. Suaïs (1990) - Méthode COP, laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Malaga - Méthode PI, développée par le BGR - Approche européenne LEA 	

Ces méthodes (à l'exception des méthodes GOD et AVI) exploitent un critère relatif à la géomorphologie du territoire étudié :

- soit la pente prise en compte directement au travers de sa valeur absolue (DRASTICS, SINTACS ou Z. Alamy et C. Langevin en 1989)
- soit la pente par un facteur indirect (DISCO, MF. Suaïs 1990), reprenant la densité de drainage des réseaux hydrologiques de surface

Toutes les méthodes d'étude (DRASTICS, SINTAC, AVI,...) citées ci-dessus supposent l'intégration de nombreuses données dont l'acquisition, à l'échelle régionale, demande un investissement en temps et ressource difficilement mobilisable.

2.2.2. Critères de vulnérabilité intrinsèque

La caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque (cf.2.1.1) nécessite la prise en compte de plusieurs critères, chaque critère ayant un impact sur la protection de l'aquifère sous-jacent. Ces différents critères sont ainsi présentés ci-dessous.

Critères relatifs aux conditions de surface ou sub-surface :

La quantité d'eau qui ruisselle et donc ne s'infiltre pas dépend entre autres de la *pente*. *Les critères de pédologie* comme la nature des sols, leur texture, la perméabilité verticale des sols, vont réguler la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la ZNS.

Critères relatifs à la zone non saturée :

La profondeur de la nappe libre (= l'épaisseur de la Zone Non Saturée) conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc son éventuelle dégradation en cours de transfert ;

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.

La perméabilité verticale de la ZNS dicte le temps de transfert ou même peut empêcher le transfert vertical d'un polluant vers la nappe ;

La structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matières organiques et argile) conditionne la migration de fluides vers la nappe.

Critères relatifs à la zone saturée :

Ces critères ne sont pas toujours pris en compte dans la détermination de la vulnérabilité. Certains auteurs considèrent uniquement la facilité et la rapidité suivant lesquelles des matières polluantes d'origine superficielle peuvent atteindre l'eau souterraine et ne prennent pas en compte les conditions hydrodynamiques de la zone saturée. La nappe est alors considérée comme vulnérable, dès l'instant où le polluant l'a atteint.

Les critères relatifs à la zone saturée sont les suivants :

Le type de nappe (libre ou captive) joue un rôle important : 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.

La transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement et le gradient hydraulique déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe ;

La piézométrie et le type de relation entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (drainage ou alimentation) conditionnent la possibilité de contamination des eaux souterraines. Entre les hautes eaux et les basses eaux, les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser.

Les directions et sens d'écoulement de la nappe déterminent les espaces susceptibles d'être atteints par un polluant une fois que celui-ci a atteint la nappe.

Le type de système hydrogéologique (transmissif ou inertiel) joue sur les temps de transfert et temps de séjour dans la nappe.

La recharge, c'est-à-dire la quantité d'eau atteignant la Zone Saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette) constitue aussi un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

La quantité d'eau en réserve détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe.

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

Le système de fracturation, les discontinuités verticales telles que les failles peuvent augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe ;

Le bilan hydrique détermine l'infiltration efficace et donc la potentialité d'un polluant à pénétrer le sous-sol. Les principaux facteurs le déterminant sont le climat, l'ETP (EvapoTransPiration) et la quantité de précipitations.

Le Tableau 2 ci-dessous récapitule, par ensemble souterrain, les différents critères cités ayant un impact sur la protection d'un aquifère.

Tableau 2 : Critères de vulnérabilité

VULNERABILITE INTRINSEQUE		
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée
Topographie (pente)	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe (libre ou captive)
Pédologie (perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols)	Temps de transfert (perméabilité verticale)	Temps de résidence (dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères)
Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)		Relation eaux souterraines/eaux superficielles
	Structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile)	Piézométrie (sens et direction d'écoulement et évolutions selon la période du cycle hydrologique)
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)
		La recharge (recharge annuelle nette).
		Type de système hydrogéologique (caractères plus ou moins capacitif et transmissif)
	Battement de nappe	
	Fracturation (directions et densité)	

2.2.3. Méthode basée sur l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux

La méthode de l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux a été utilisée en prenant en compte les deux critères suivants :

- **L'indice de développement et de persistance des réseaux** qui permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité intrinsèque des formations du sous-sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie. Cette notion d'infiltration est requise dans l'élaboration de toute carte de vulnérabilité et l'IDPR peut se substituer à de nombreux critères usuellement employés.
- **L'épaisseur de la zone non saturée** : dans un milieu continu ou assimilé continu, la vulnérabilité de l'aquifère diminue avec la profondeur à laquelle il se trouve.

L'indice de développement et de persistance des réseaux (**IDPR**) se fonde sur l'analyse des réseaux hydrologiques et celle du modèle numérique de terrain. Cet **approche indirecte** permet de s'affranchir de la détermination de critères tels que la perméabilité de l'aquifère, la nature de la ZNS et du sol, la cartographie des discontinuités.... Ces paramètres peuvent en effet être approchés à une petite échelle

(par exemple pour évaluer la vulnérabilité du bassin d'alimentation d'un captage), mais ils sont très difficiles à estimer avec précision à une échelle départementale ou régionale. L'IDPR tend ainsi à unifier et simplifier l'approche géomorphologique relative à la nature des formations de couverture des premières nappes rencontrées.

Au niveau régional, la première carte de vulnérabilité produite avec l'IDPR a porté sur le territoire métropolitain de l'Agence de bassin Seine- Normandie, la méthodologie a été validée au sein d'un groupe de travail constitué des représentants du MEDD, de l'agence de l'eau, des DIREN, des DRIRE et du BRGM (Mardhel et al, 2006). Depuis, les territoires de l'Agence de l'eau Loire- Bretagne, des régions Nord-Pas-de-Calais et Aquitaine ont été traités ainsi que celui de l'Agence Rhône Méditerranée Corse où l'indice IDPR a été calculé dès 2003.

Entre 2002 et 2006, cette méthode a été appliquée en Guadeloupe pour cartographier la vulnérabilité des nappes de Grande-terre et de Marie Galante (Bezalgues et al, BRGM/RP-51783, 52677 53 456 et 54339).

La méthode indirecte basée sur l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux a été utilisée à l'échelle nationale sur la Slovénie (Mardhel et al, 2004). Et dernièrement, cet indice a été calculé à l'échelle européenne pour le programme de recherche FOOTPRINT (<http://www.eu-footprint.org>). Ce projet est en cours et vise à développer des outils d'évaluation du risque de contamination des eaux par les pesticides.

La vocation de cette méthode n'est pas de se substituer aux cartes de vulnérabilité réalisées à plus petite échelle, mais de constituer un indicateur d'un état général de vulnérabilité.

La carte obtenue doit être interprétée comme une **hiérarchisation de la vulnérabilité des premières nappes rencontrées. Cette hiérarchisation, du plus vulnérable au moins vulnérable, pourra notamment permettre de cibler les zones prioritaires en matière de protection de la ressource.**

3. Calcul de l'Indice de Développement et de Persistance de Réseaux

3.1. DEFINITION

L'idée qui sous-tend l'IDPR découle des observations suivantes, ***l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent*** (cf. Annexe 2 : Corrélations entre la forme du réseau hydrographique et les formations géologiques). 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 talwegs¹ ou lignes de plus grande pente qui par la gravité, rassemblent les eaux de ruissellement, doit donc conduire à la reproduction du réseau hydrographique.

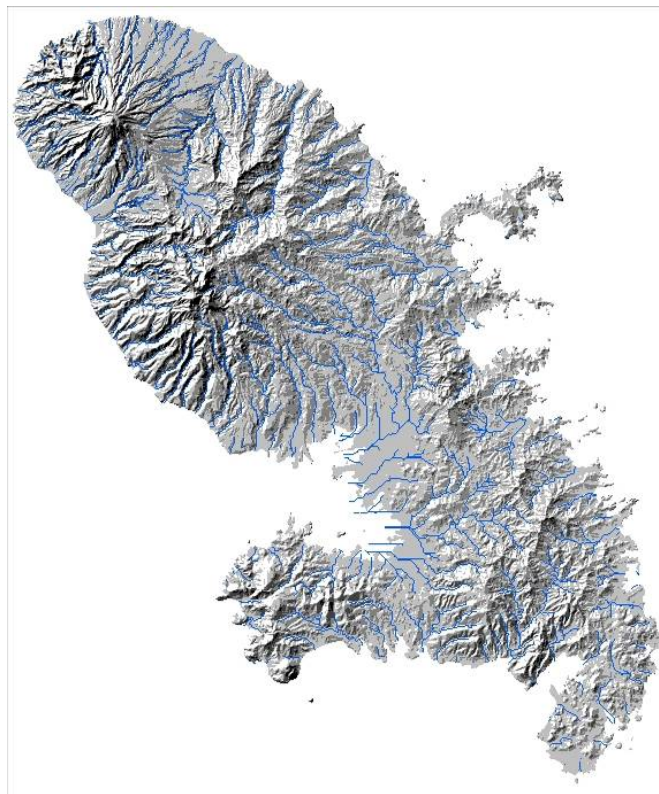


Figure 2: Réseau hydrographique calculé selon les lignes de plus grande pente, sur fond MNT ©BDTOPO

¹ Talweg est un mot allemand signifiant : chemin de la vallée

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.

3.2. DONNEES NECESSAIRES

Afin de calculer l'IDPR, les données suivantes sont nécessaires :

- le réseau hydrographique naturel (réel/observé),
- le modèle numérique de terrain (nécessaire pour calculer les pentes, les bassins versants et les talwegs)
- La cartographie des unités aquifères d'ordre 1 telles que définies dans le rapport BRGM/RP-55099-FR,
- Les limites des masses d'eau souterraines (telles que définies dans le rapport BRGM/RP-52688-FR),
- les bassins versants de surface
- la géologie vectorisée

3.3. RESEAU HYDROLOGIQUE NATUREL

Le réseau hydrologique naturel, utilisé dans la démarche de calcul de l'IDPR provient des données de la BD TOPO IGN©. Il s'agit plus précisément de la version 1.2 de la BD TOPO® Pays produite par l'Institut Géographique National.

Les couches d'information géographique utilisées sont TRONÇON_COURS_EAU et SURFACE_EAU en format Shapefile. Les attributs exploités pour l'analyse sont le régime des cours d'eau (permanent ou intermittent), leur nature (artificiel ou non) et la source des données (issue de photogrammétrie par exemple).

Le réseau hydrologique naturel est ainsi présenté dans la Figure 3.

La BD Carthage, réalisée par la DIREN en 2007-2008 n'était pas disponible au moment de l'élaboration du calcul de l'IDPR.

Après concertation avec la DIREN, et compte tenus de l'échelle de travail (1/50 000^{ème}) et de l'objectif de notre étude, les différences entre la BD TOPO et la BD Carthage n'ont pas été jugées suffisamment significatives, et l'utilisation de la BD TOPO est donc pertinente.

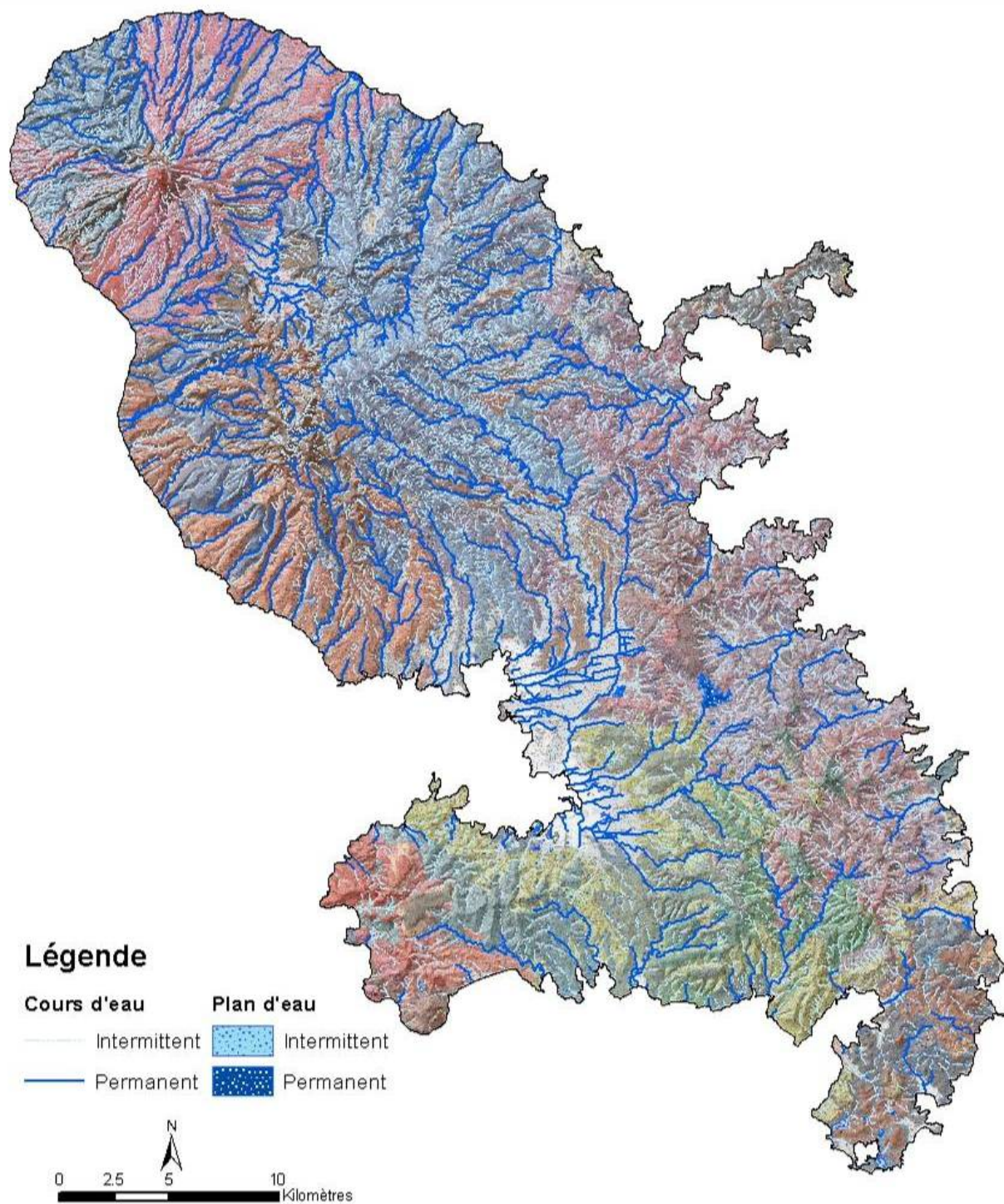


Figure 3: Réseau hydrologique naturel extrait de la BD TOPO® Pays de l'IGN

3.4. RESEAU THEORIQUE ISSU DU RELIEF

Le réseau théorique des écoulements est fondé sur l'analyse des talwegs. Il s'établit à partir du modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 20m.

Seule l'altitude est fournie de manière "brute" par le MNT. Le calcul des pentes, des bassins versants et des talwegs font appel aux techniques de traitements spatiaux intégrés aux logiciels de Système d'Information Géographique.

La plupart de ces logiciels permettent de générer automatiquement des limites de bassins versants à partir d'un MNT. Les traitements exploités dans le cadre de cette étude ont été développés pour l'application ArcView©. Les procédures utilisées proviennent de l'Université du Texas à Austin. Elles ont été développées pour Arcview par le Center for Research in Water Resources (CRWR).

L'extraction automatique de réseaux (de talwegs ou de crêtes) exploitée dans cette étude peut être assimilée à une démarche structuraliste inspirée du modèle physique du ruissellement de l'eau sur un relief.

Elle se fonde sur trois étapes :

- La première utilise un algorithme basé sur la recherche de "points de talwegs". Dans une fenêtre centrée sur le pixel à traiter, on examine le voisinage afin de détecter un changement de pente concave.
- La seconde étape calcule le "graphe dérivé" du MNT qui attribue à chaque point la direction de la maille voisine suivant la plus grande pente. Cet ensemble de "cellules de drainage" décrit un bassin versant lorsque l'exutoire est situé sur le bord du MNT ou un "bassin de dépression" lorsque tous les chemins décrits en suivant les cellules aboutissent en un minimum local.
- Enfin l'application trace dynamiquement des lignes, en partant de certains points choisis et en suivant la ligne de plus grande pente jusqu'à arriver soit en bord d'image, soit en un minimum local, soit enfin jusqu'à rencontrer une ligne déjà tracée.

Même si les données issues du MNT de la Martinique sont précises, il reste des dépressions pour lesquelles aucun exutoire n'est possible et il est nécessaire de traiter ces zones afin de rétablir l'écoulement potentiel.

3.4.1. Pré-traitement du MNT – zones de dépression

Les solutions sont généralement basées sur l'hypothèse suivante : si l'eau s'écoule en surface et s'il y a une dépression naturelle, l'eau remplit préalablement celle-ci avant de continuer sa route vers l'aval. La première des techniques de traitement des dépressions considère les dépressions comme des artéfacts altimétriques ne représentant aucune forme réelle (Jenson et Domingue 1998). De ce fait, certains auteurs procèdent au comblement des dépressions après avoir déterminé l'exutoire de la dépression : c'est la technique dite du « bouche-trous ». Dans ce cas, on détermine la cellule exutoire et on affecte à toutes les cellules de la dépression l'altitude de cet exutoire.

La seconde, décrite par Fairfield et Leymarie (1991), vise à déterminer l'exutoire de la dépression puis à inverser le chemin d'écoulement entre le fond de la dépression et cet exutoire. Ceci aura pour effet de rendre la continuité du réseau hydrographique. Pour déterminer quelle cellule représente l'exutoire, il faut trouver, parmi toutes les cellules ne recevant pas d'eau d'une autre cellule et s'écoulant vers le fond de la dépression, laquelle possède l'altitude la plus basse.

Enfin, une dernière méthode répandue consiste à identifier une zone d'altitude forte entre deux dépressions et à creuser cette zone de façon à ce que l'eau de la dépression puisse s'écouler en aval.

A l'usage, ces techniques offrent toutes des résultats comparables. L'algorithme de traitement des dépressions n'influence donc pas de manière significative le réseau obtenu par extraction automatique. Cependant, c'est au niveau de la modification du MNT que se situent les différences essentielles de ces méthodes. En effet, si la seconde technique indiquée ci-dessus est sans effet sur les altitudes, les deux autres vont les modifier. Par souci de simplification des outils mis en œuvre, la seconde méthode est celle retenue pour le processus de calcul de l'IDPR.

3.4.2. Prise en compte de la pluviométrie

La pluviométrie de l'île est très contrastée avec une dissymétrie nette entre le nord très pluvieux et le sud bien moins arrosé (cf. Figure 4).

La carte de pluie efficace déduite de l'étude sur l'« Elaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique » de juin 2007² illustre elle-aussi un fort gradient entre le nord et le sud (cf. Figure 5).

² 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, 221 p., 87 ill., 8 ann.

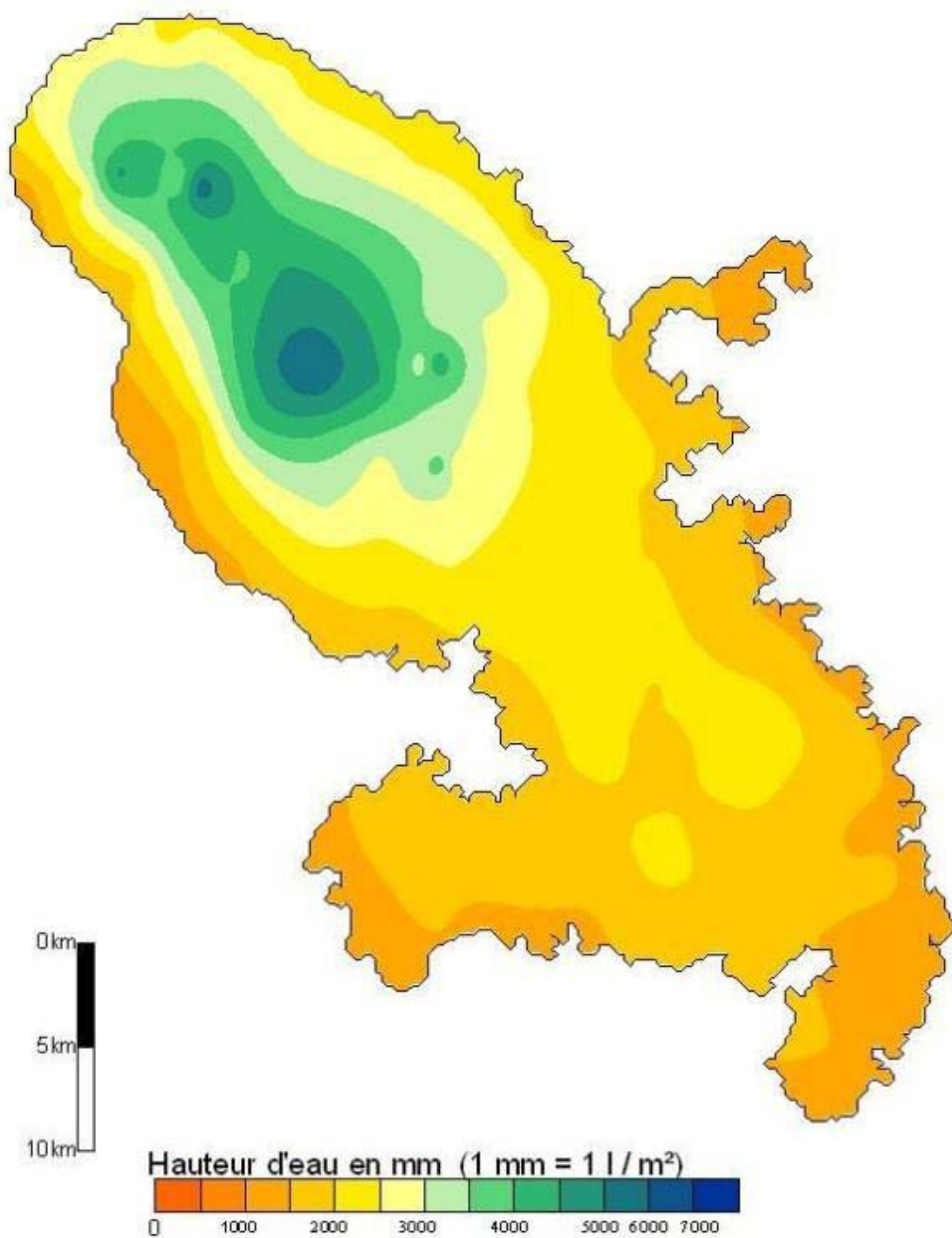


Figure 4: Pluviométrie moyenne annuelle en Martinique (1915-2006) en mm/an
(source : MétéoFrance, juin 2006)

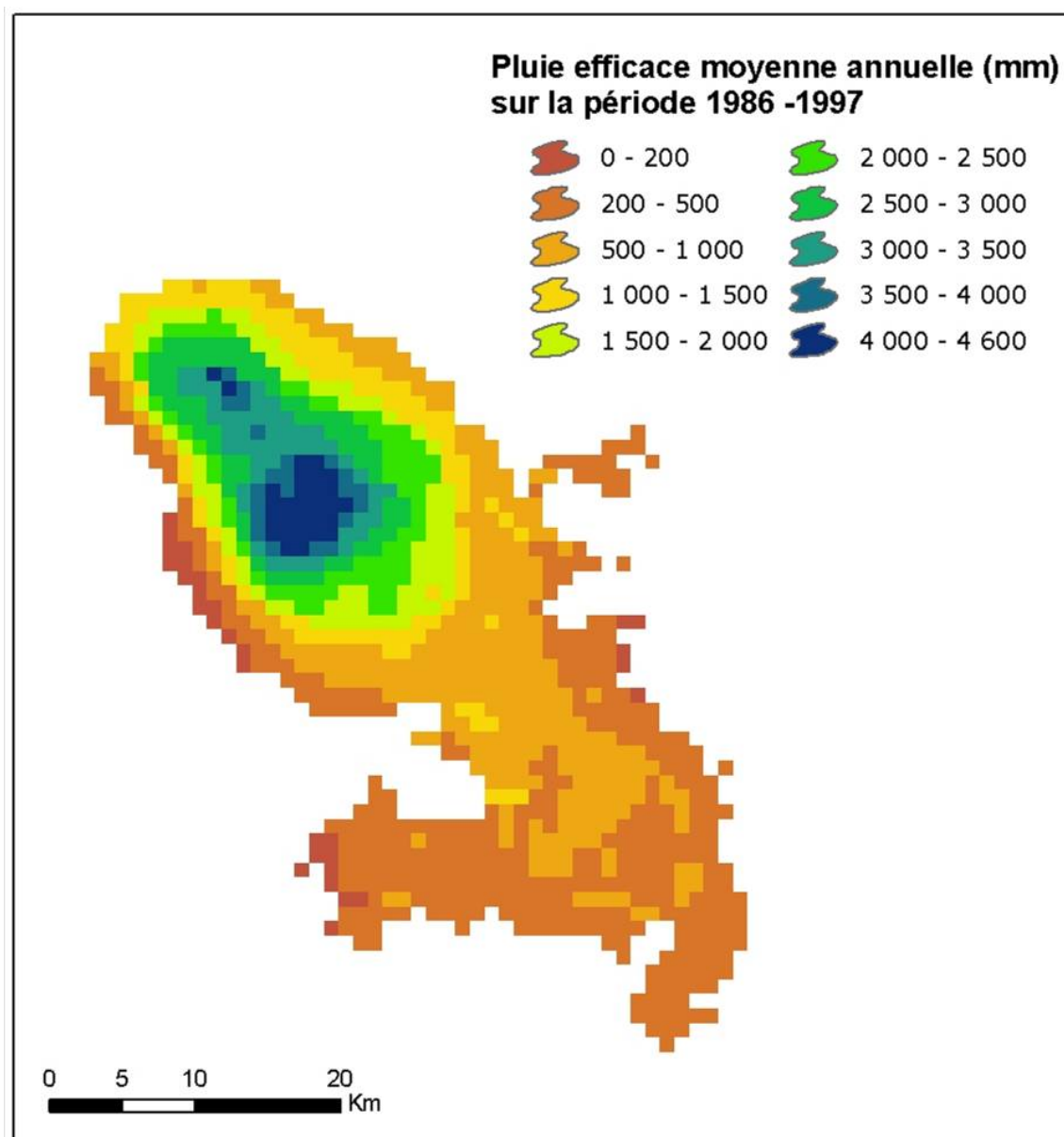


Figure 5 : Résultat du calcul de pluie efficace (BRGM/RP - 55099 - FR)

Ce contraste de pluviométrie efficace influe sur les réseaux hydrologiques naturels. Afin de comparer au mieux les réseaux naturels aux réseaux théoriques, deux réseaux de talwegs ont été calculés. La différence entre les deux réseaux est la surface minimale nécessaire pour initier un talweg. Elle est équivalente à 250 cellules pour le réseau « classique » qui sera utilisé pour la plus grande partie de l'île et elle est équivalente à 200 cellules pour le réseau particulier avec la plus forte pluviométrie (secteur de la Montagne pelée). Par conséquent, ce second réseau de talwegs sera plus dense que le premier, cela correspond en outre à ce que l'on peut observer sur le terrain (Cf. Figure 3).

3.4.3. Réseaux de talwegs calculés

Les réseaux de drainage obtenus représentent la hiérarchisation de la réponse d'un milieu imperméable soumis au ruissellement d'une lame d'eau. Les figures suivantes présentent la restitution cartographique des réseaux de talwegs calculés.

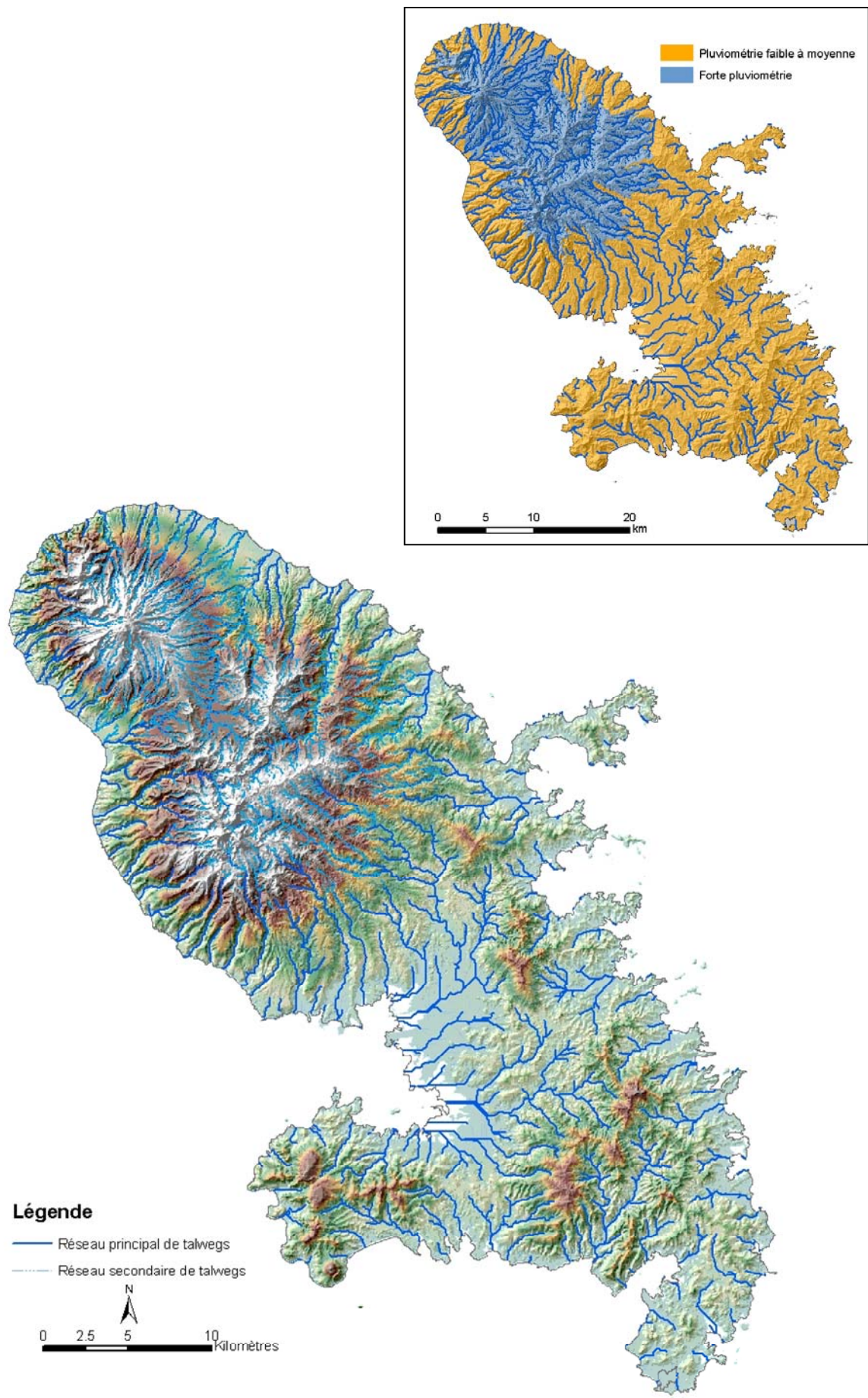


Figure 6: Réseaux de talwegs calculés

3.5. CALCUL DE L'IDPR

L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface (cf. chapitre 3.1).

Il se calcule en comparant le réseau hydrographique naturel au réseau de talwegs calculés :

L'IDPR résulte du rapport entre la distance au plus proche cours d'eau réel et la distance au plus proche talweg calculé. Il varie selon une échelle comprise entre 0 et n et est arbitrairement ramené à une gamme de 0 à 2000. Les deux distances calculées sont **pondérées par la pente**.

L'IDPR est inférieur à 1000 quand le réseau théorique n'est pas repris par une rivière réelle. Ce rapport indique alors une infiltration majoritaire des eaux. Inversement, quand le réseau réel est plus dense que le réseau calculé, on est en zone de ruissellement majoritaire, l'IDPR tend vers 2000 (Tableau 3).

Tableau 3 : Valeurs de l'IDPR

IDPR < 1000	Infiltration majoritaire par rapport au ruissellement superficiel. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel.
IDPR = 1000	Infiltration et ruissellement superficiel de même importance. Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les écoulements en place.
IDPR > 1000	Ruissellement superficiel majoritaire par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg.
IDPR voisin ou égal à 2000	Stagnation transitoire ou permanente des eaux, menant à deux interprétations différentes. Si la nappe est proche de la surface des terrains naturels, (cours d'eau et zones humides), le terrain est saturé et l'eau ne s'infiltré pas. Si la nappe est profonde, le caractère ruisselant peut démontrer une imperméabilité des terrains naturels.

La Figure 7 présente le résultat du calcul de l'indice IDPR sur la totalité de la Martinique. Le maillage est composé de cellules de 20m de côté. Les zones rouges et bleues indiquent respectivement les zones infiltrantes et ruisselantes.

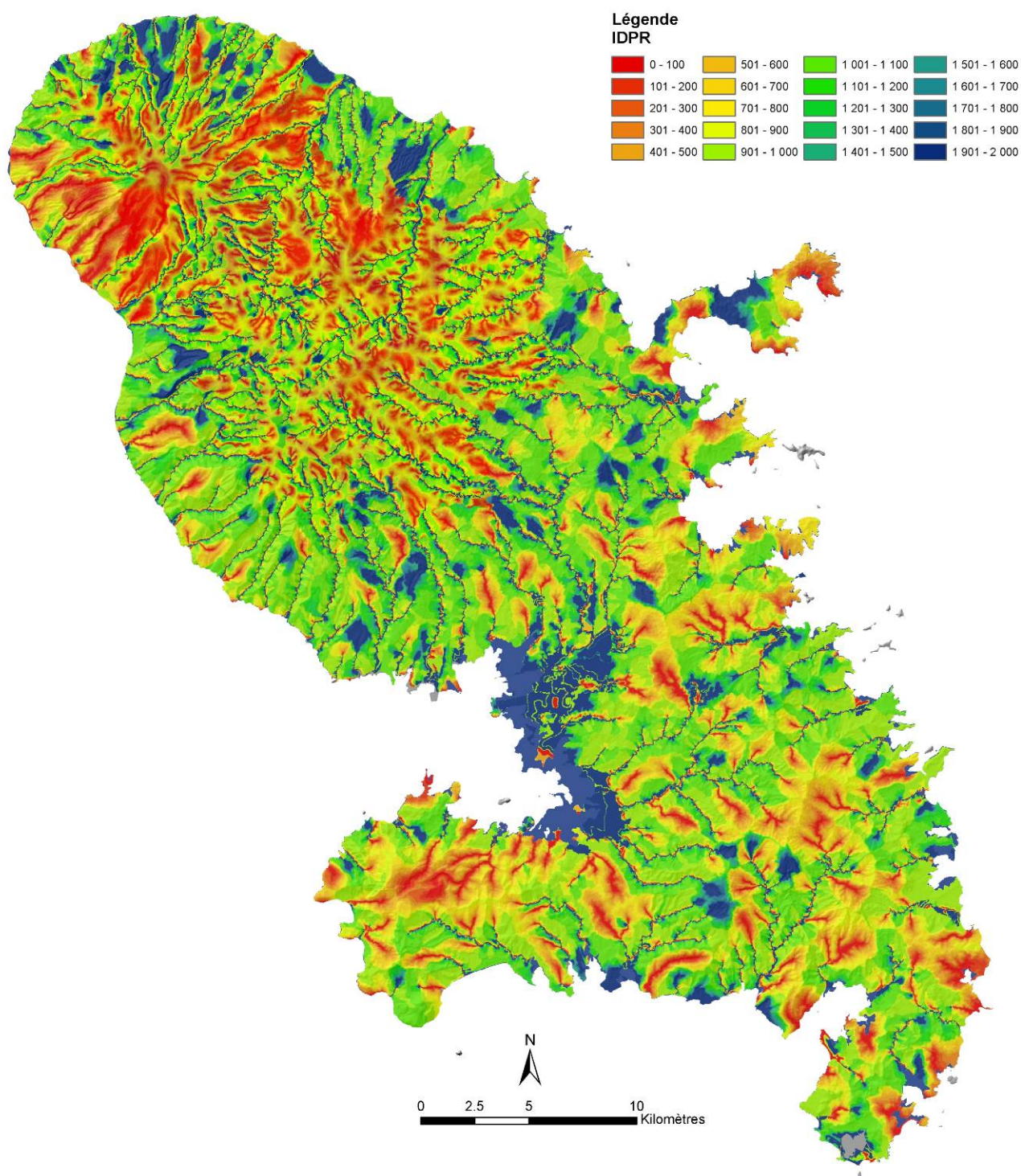


Figure 7: Résultat du calcul de l'IDPR sur la totalité de la région. Les zones rouges et bleues indiquent respectivement les zones infiltrantes et ruisselantes

3.6. REPRESENTATION PAR UNITES FONCTIONNELLES

Afin de faciliter la lecture, l'interprétation et la représentativité des résultats maillés de l'IDPR (Cf. Figure 7) ceux-ci ont été affectés à des unités fonctionnelles.

Pour ce faire, il est nécessaire de définir de petites entités cohérentes sur le plan hydrogéologique. La création de ces entités est le résultat du croisement de diverses couches de données :

- les principaux bassins versants de surface,
- le référentiel des masses d'eau souterraines,
- la géologie vectorisée,
- les unités aquifères d'ordre 1 définies dans le premier projet.

Des unités fonctionnelles cohérentes sont ainsi obtenues et présentées dans la Figure 8).

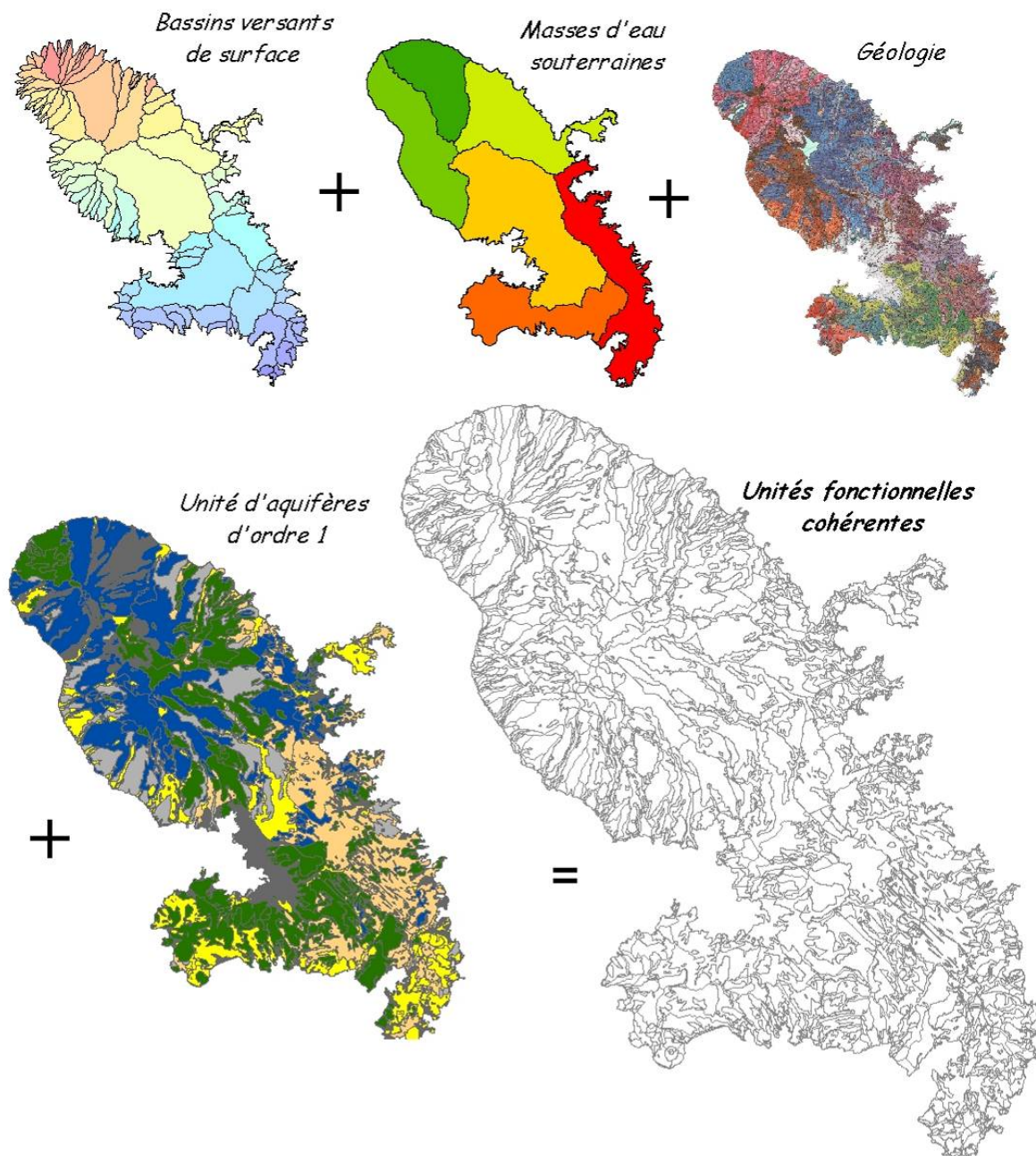


Figure 8 : Définition d'unités fonctionnelles

Le résultat de l'IPDR a ensuite été affecté à chaque unité fonctionnelle ainsi créé, grâce aux techniques de statistiques zonales (médiane du critère IDPR). Le résultat est présenté Figure 9.

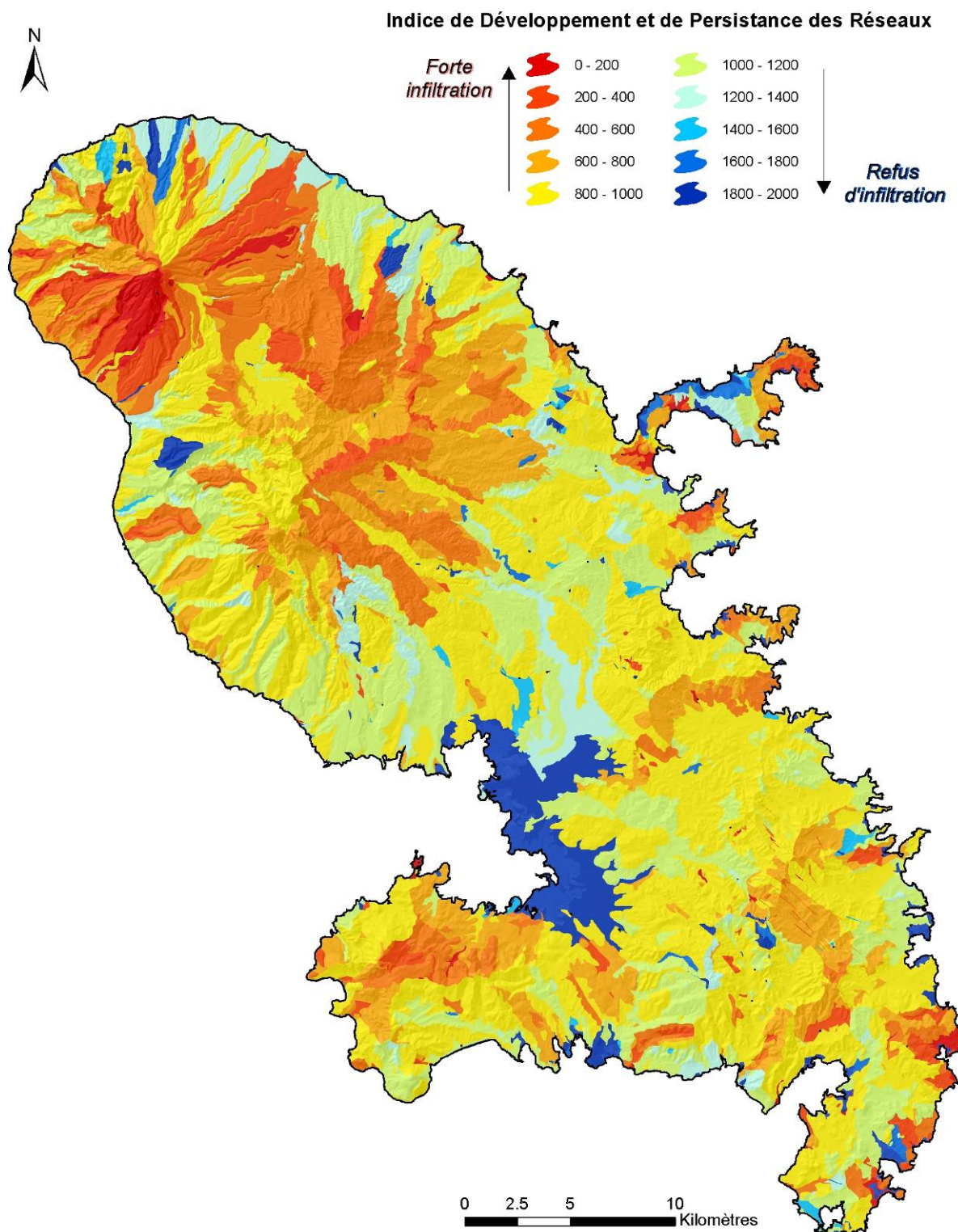


Figure 9 : Valeur de l'IDPR par unités fonctionnelles

Cette carte met en évidence les zones où la capacité d'infiltration dans le milieu souterrain est majoritaire ($IDPR < 1000$) et les zones où la capacité d'infiltration est faible ($IDPR > 1000$). On constate une bonne concordance entre ces zones et les principales formations géologiques de la Martinique.

4. Hiérarchisation de l'épaisseur de la zone non saturée

4.1. PROFONDEUR DE LA NAPPE

La protection naturelle d'un aquifère vis-à-vis des pollutions dépend de plusieurs paramètres (cf. chapitre 2.2.2 : Critères de vulnérabilité intrinsèque). Parmi tous ces critères, l'épaisseur de la zone non saturée est un critère souvent intégré aux calculs de la vulnérabilité.

Pour un aquifère libre, l'épaisseur de la zone non saturé (ZNS) est la distance entre la surface du sol et le niveau de la nappe. (cf. Figure 10). Pour un aquifère captif, elle est égale à la distance entre la surface et le toit de l'aquifère.

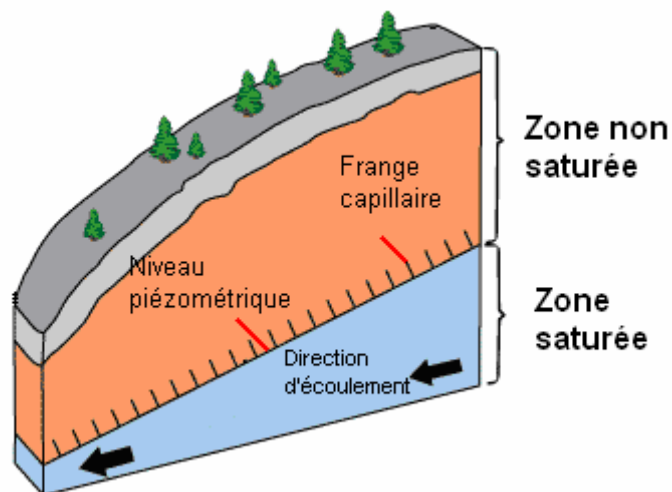


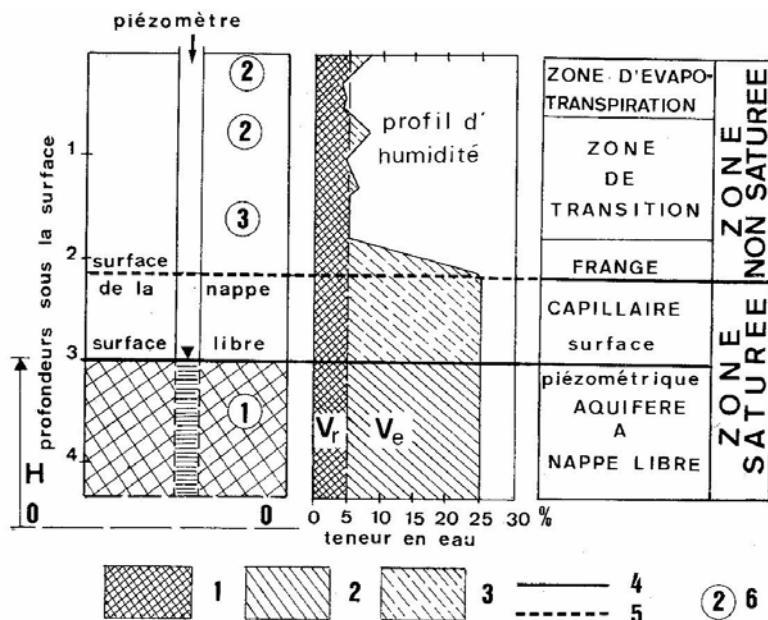
Figure 10: Définition de la zone non saturée

Source : <http://geology.er.usgs.gov/eespteam/brass/ground/groundintro.htm>

Au sein de la ZNS la quantité d'eau gravitaire est temporaire, en transit. Elle se divise en trois parties, différenciées en fonction de leur teneur en eau :

- Une zone d'évapotranspiration qui est soumise à d'importantes variations de la saturation en eau ;
- Une zone de transition où la teneur en eau correspond à la capacité de rétention du sol ;

- La frange capillaire qui, en plus de la percolation per descensum (recharge) correspond à l'eau de la nappe remontant par ascension capillaire.



1, eau de rétention ; 2, eau gravitaire ; 3, eau capillaire ; 4, surface piézométrique ou surface libre ; 5, surface de la nappe

Figure 11 : Définition de la zone non saturée. (Hydrogéologie, Castany, 2000)

Ainsi, pour deux unités semblables, celle ayant une épaisseur de ZNS plus importante sera moins vulnérable que celle ayant une faible épaisseur de ZNS.

4.2. CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE

L'épaisseur de la ZNS est connue dans les seuls secteurs où des forages ont été réalisés. Ainsi, elle n'est pas connue en tout du point du territoire de la Martinique.

Cette information a été calculée sur les 174 forages référencés en BSS (Figure 12) et pour lesquels les éléments nécessaire au calcul sont disponibles (Cf. chapitre 4.2 du Rapport BRGM/RP-55099). Pour cela, on soustrait l'altitude moyenne du toit de la nappe en mètres NGM à la cote altimétrique du terrain naturel, ou par sécurité l'altitude en hautes eaux du toit de la nappe en mètres NGM à la cote altimétrique du terrain naturel.

Ce calcul permet de connaître ponctuellement l'épaisseur de la zone non saturée.

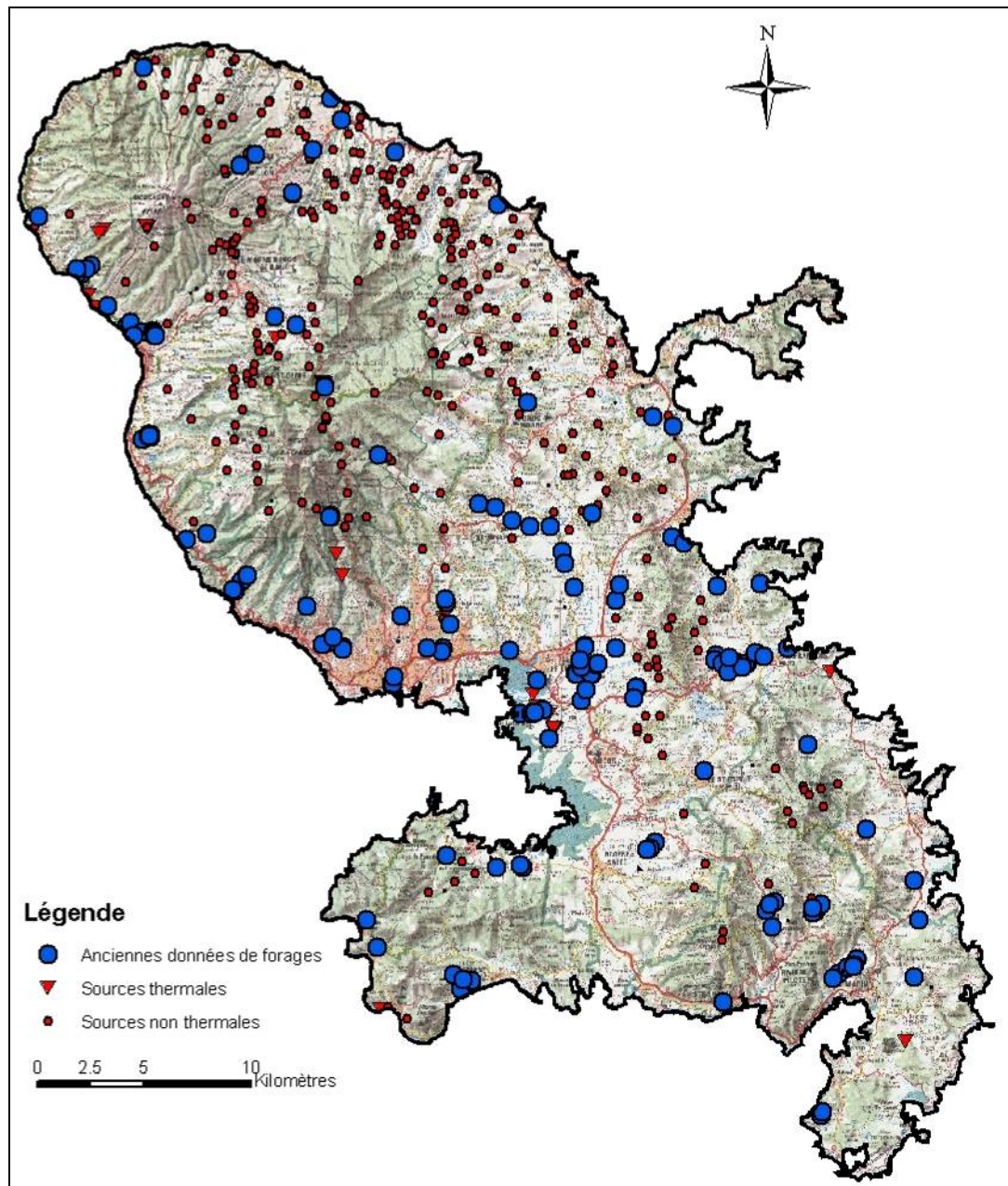


Figure 12: Localisation des données disponibles sur fond IGN ©BDTOPO

Afin d'extrapoler les données ponctuelles disponibles, une hiérarchisation et une spatialisation de l'épaisseur a été réalisée. Tout d'abord 2 grands ensembles ont été définis : les secteurs où une information est disponible et les secteurs où aucune information sur la ZNS n'est disponible.

Compte tenu de la complexité des systèmes aquifères en milieu volcanique, et pour ne pas aboutir à une approximation hasardeuse de l'épaisseur de la ZNS, les secteurs pour lesquels aucune information sur la ZNS n'est disponible seront identifiés comme telle.

Afin de s'affranchir des incertitudes sur les données disponibles (généralement une seule valeur est disponible par point, sauf pour les points du réseau piézométrique), les secteurs où la densité d'ouvrages piézométriques était suffisante ont été classés selon une échelle relative avec des épaisseurs de ZNS variant entre faible et forte.

La Figure 13 synthétise et représente le résultat de la hiérarchisation de la ZNS. La cartographie est ainsi limitée aux secteurs pour lesquels des données sont disponibles.

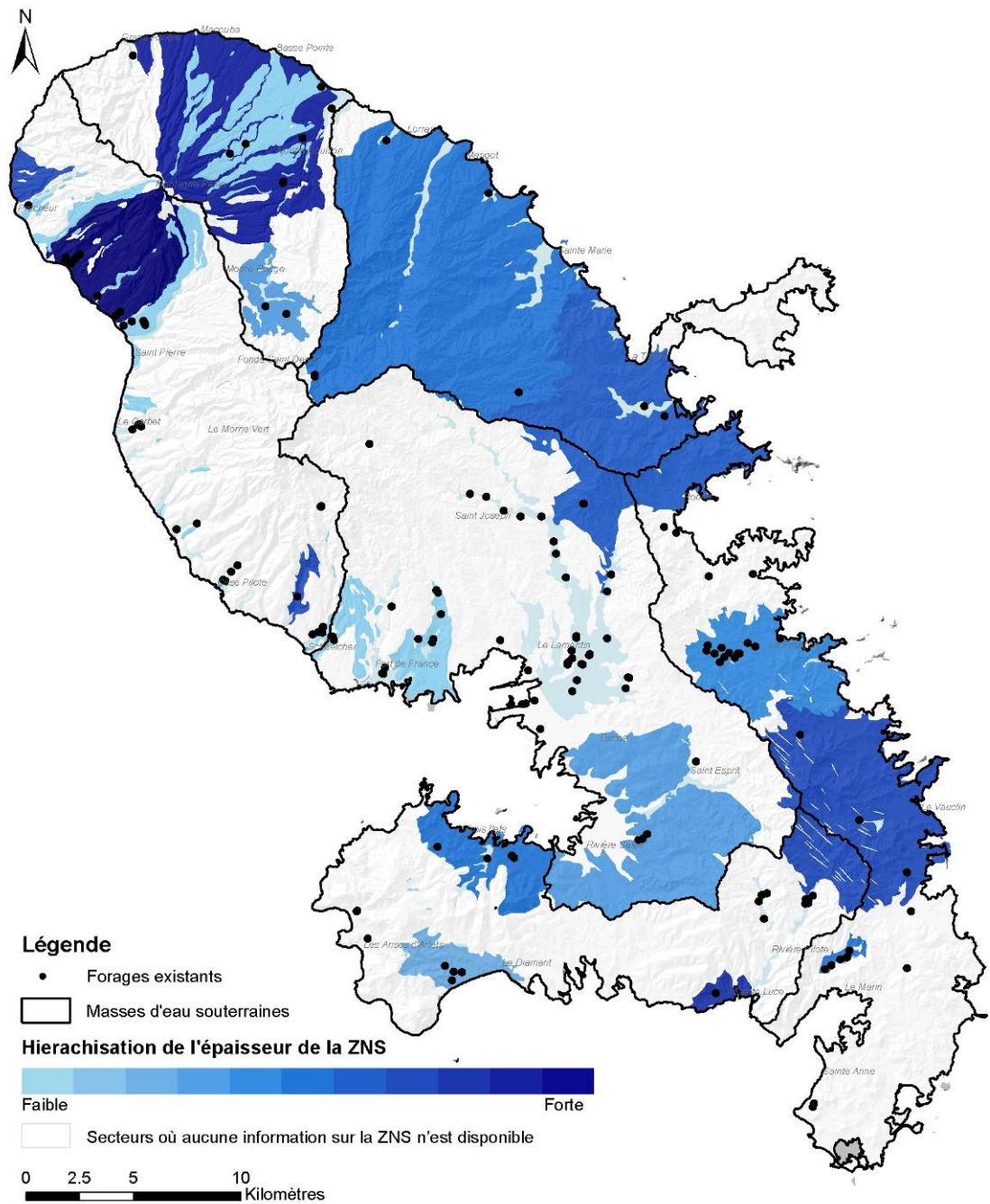


Figure 13 : Hiérarchisation de l'épaisseur de la ZNS

5. Cartographie de l'indice de vulnérabilité

Afin d'obtenir une cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de Martinique, l'IDPR calculé selon la méthode exposée chapitre 3.6 doit être pondérée d'une part en fonction du type de nappe et d'autre part en fonction de l'épaisseur de la ZNS.

5.1. PONDERATION DE L'IDPR EN FONCTION DU TYPE DE NAPPE

L'épaisseur et la nature des formations recouvrant la nappe jouent un rôle important dans l'évaluation de la vulnérabilité. Les nappes libres (celles qui ne sont pas en charge sous un niveau imperméable) sont les plus vulnérables : les polluants peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau de la nappe.

Lors de la première approche, le critère IDPR défini dans le chapitre 3.6 a été calculé sans distinguer le type des réservoirs aquifères auxquels il pouvait être associé.

Néanmoins, dans un contexte très infiltrant et notamment lorsque l'épaisseur de la ZNS est inconnue, un indice IDPR faible n'a pas la même influence sur la vulnérabilité de l'aquifère, si l'on se trouve dans une nappe captive (les hyaloclastites de la plaine du François par exemple) que dans une nappe libre (les nuées ardentes de Basse Pointe par exemple).

Une pondération non linéaire du critère IDPR a ainsi été appliquée afin de prendre en compte le type de nappe : la valeur du critère affectée à l'indice IDPR (pondérée de 0 à 100) varie en fonction de la nature de l'écoulement (libre ou captif).

Trois occurrences sont ainsi distinguées : les nappes libres, les nappes semi-captives et les nappes captives.

Ainsi, pour une valeur du critère IDPR calculée en un lieu donné, une valeur plus forte sera affectée au critère IDPR dans le cas d'une nappe libre (soumise directement à une éventuelle pollution) et moins forte dans le cas d'une nappe captive (mieux protégée des pollutions affectant la surface).

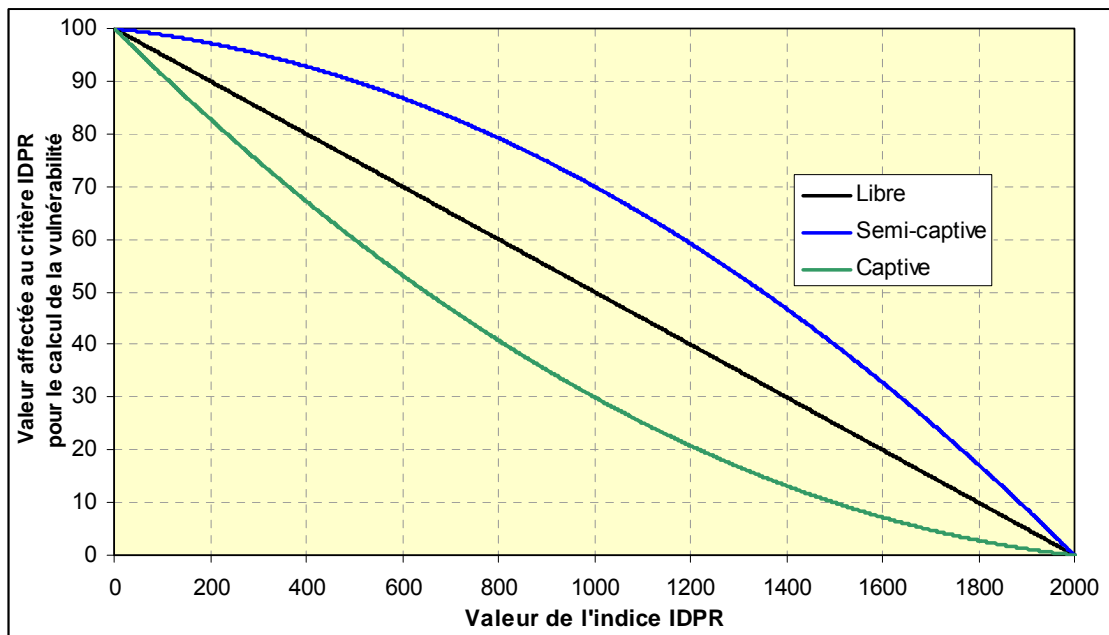


Figure 14 : Valeurs normées du critère IDPR selon la nature de la nappe d'eau souterraine

La valeur du critère IDPR ainsi pondérée est représentée sur la carte Figure 15.

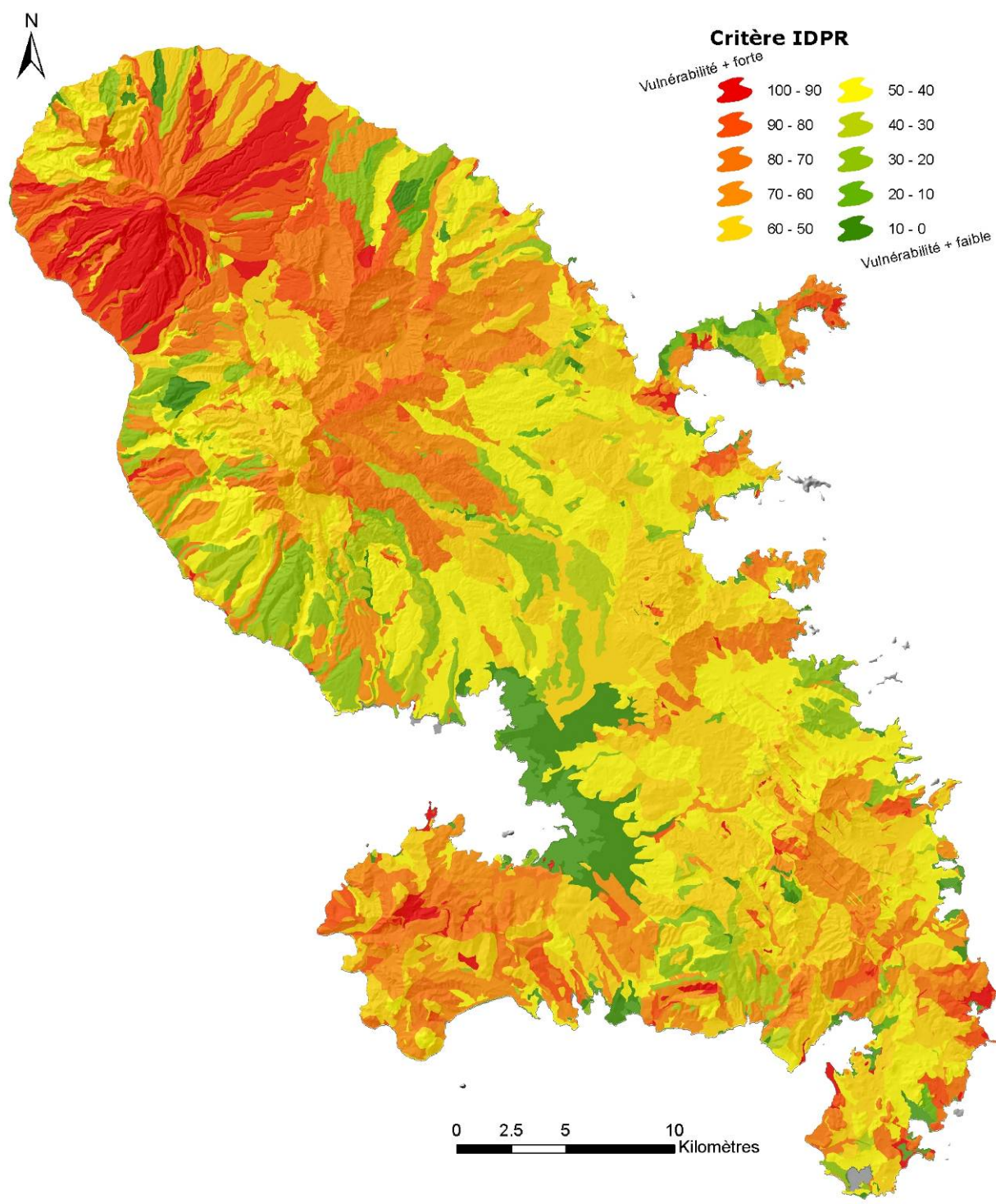


Figure 15 : Critère IDPR affecté aux unités fonctionnelles

5.2. PONDERATION DU CRITERE IDPR EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE ZONE NON SATURÉE

Le critère IDPR défini ci-dessus (cf. Figure 15) sera également pondéré en fonction de l'épaisseur de la ZNS, telle que défini dans le chapitre 4 et représentée sur la Figure 13.

La formule de calcul de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines est la suivante :

$$V_i = (\text{Poids IDPR} * [\text{Critère IDPR}]) + (\text{Poids ZNS} * [\text{Critère ZNS}])$$

Avec : Poids IDPR + Poids ZNS = 1, V_i compris entre 0 et 100

La valeur des poids varie en fonction de la lithologie de l'aquifère. Sept occurrences sont distinguées, selon l'importance accordée au critère ZNS (cf. Tableau 4).

Tableau 4 : pondération du critère IDPR en fonction de la ZNS

Lithologie simplifiée	IDPR	ZNS
<i>Alluvions</i>	20%	80%
<i>Andésite, Basalte, Dacite, Scorie</i>	50%	50%
<i>Calcaires</i>	50%	50%
<i>Dépôts, Dyke, Mangroves</i>	100%	0%
<i>Hyaloclastites</i>	50%	50%
<i>Lahars, Conglomérats, Grès</i>	100%	0%
<i>Nuées ardentes, brèches, ponces</i>	70%	30%

Le critère ZNS joue un rôle d'autant plus important que l'épaisseur de la ZNS diminue et atteint des valeurs très faibles (quelques mètres seulement) : c'est le cas notamment dans les formations alluviales. Pour cette raison, le poids à donner au critère ZNS par rapport au critère IDPR doit être **nettement plus fort** dans les plaines alluviales à nappe très peu profonde. Autrement dit, si la nappe est présente à proximité immédiate du sol (épaisseur de la ZNS < 3m), celle-ci sera considérée comme très vulnérable.

5.3. CARTE DE VULNERABILITE

La carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique est présentée Figure 16. Afin de faciliter la lecture, des cartes ont été réalisées par masses d'eau et sont jointes à ce rapport (annexe 3).

Globalement, on constate qu'environ la moitié des unités fonctionnelles présente une vulnérabilité moyenne, un quart une vulnérabilité plus forte et un quart une vulnérabilité plus faible.

Les secteurs où la vulnérabilité est la plus forte se répartissent ainsi :

- Autour de la Montagne Pelée, un certain nombre d'unités présente une forte vulnérabilité, il s'agit des aquifères situés dans les nuées ardentes et ponces. Dans ce type de formation les nappes sont libres et l'épaisseur de zone non saturée est globalement élevée. Les perméabilités de ce type de milieu sont également les plus fortes observées en Martinique, et, compte tenu du caractère libre des nappes, ces formations auraient donc une plus forte vulnérabilité. Les résultats des analyses de la qualité de l'eau dans ce secteur de l'île confirment la forte vulnérabilité des nappes : les points d'eau situés en aval des parcelles agricoles ont de fortes concentrations en nitrates et en produits phytosanitaires.
- Les nombreuses petites nappes alluviales accompagnant les principales rivières de l'île seraient également fortement vulnérables. Ces nappes libres, avec une très faible épaisseur de zone non saturée, seront donc les premières à être atteintes en cas de pollution.
- Dans le sud, un certain nombre d'unités auraient une plus forte vulnérabilité : les mornes dans les hauteurs des Trois îlets, les Grands Fonds et les environs du Cap Macré au Marin.

Les secteurs où la vulnérabilité est la plus faible se répartissent ainsi :

- La mangrove de la baie de Fort de France (et par extension toutes les zones de mangroves) sont des zones où le ruissellement est majoritaire : l'infiltration y est donc très faible et la vulnérabilité des nappes d'eau souterraines sous-jacentes, si elles existent, doit être faible (pour ce type de nappe se posera néanmoins la problématique du biseau salé).
- Sur la côte Caraïbes, mais aussi ponctuellement dans le Nord Atlantique ou le centre, plusieurs secteurs seraient peu vulnérables : il s'agit dans la majorité des cas de lahars ou de conglomérats, formations intrinsèquement peu perméables ce qui confirme bien leur faible vulnérabilité.
- Enfin, le secteur du Vauclin, caractérisé par des hyaloclastites serait moins vulnérable.

La méthode de l'IDPR semble donc tout à fait adaptée à la réalisation de cartes de vulnérabilité intrinsèque en milieu volcanique.

Il faut rappeler qu'il s'agit d'une carte de vulnérabilité relative : l'intérêt d'une telle carte est de pouvoir comparer des secteurs entre eux et de pouvoir définir ainsi lequel est plus vulnérable (ou moins) que l'autre. Ainsi, une entité fonctionnelle caractérisée comme ayant une faible vulnérabilité doit être interprétée comme ayant une vulnérabilité plus faible que les autres unités, et non pas, comme sur une échelle absolue, comme une unité non vulnérable.

Cette carte de vulnérabilité a ainsi vocation à devenir un véritable outil d'aide à la gestion et à la surveillance de la ressource en eau souterraine.

Par exemple, les analyses réalisées dans le cadre du réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines au titre de la DCE ont montré que les eaux souterraines présentaient une certaine vulnérabilité vis-à-vis des pollutions anthropiques, ce type de carte permettra de mieux comprendre et de mieux cibler les actions à mettre en place (contrôle, prévention, sensibilisation, modification des pratiques...). En effet, si des concentrations similaires sont observées dans des secteurs de vulnérabilité différente, cela signifiera que la pression (ou les intrants) est beaucoup plus importante dans le secteur à plus faible vulnérabilité. Inversement, à pression égale les concentrations en polluants dans le milieu souterrain seront plus faibles dans les zones à plus faible vulnérabilité.

Dans un autre registre, si des sites industriels (ou des sites de stockage de déchets) doivent être implantés, il serait plus judicieux qu'ils soient situés dans une zone où la vulnérabilité des eaux souterraines est plus faible plutôt que dans un secteur où la vulnérabilité est plus forte.

5.4. SIG

L'ensemble des données cartographiques présentées dans cette étude a été porté dans une base de données géographique au format ArcDesktop®. Les données du SIG contenues dans cette géodatabase contiennent :

- Les unités fonctionnelles décrites dans ce rapport auxquelles sont jointes les informations résultantes du calcul de vulnérabilité.
 - La valeur de l'IDPR
 - La valeur du critère IDPR
 - La valeur du critère ZNS
 - La valeur de la vulnérabilité
- Les données extraites des référentiels courants pour définir les unités fonctionnelles :
 - Les masses d'eau souterraines
 - Les bassins versants de surface
- Les données issues du calcul IDPR
 - Les réseaux de talwegs hiérarchisés (principaux et secondaires)

Elles sont également contenues sous forme de rasters avec :

- Les grilles de calcul de l'IDPR au pas de 20 m (format ARC/Info GRID)
- La grille du MNT au pas de 20 m (format ARC/Info GRID)

Ces informations sont fournies dans la projection : Fort_Dessaix_UTM_Zone_20N.

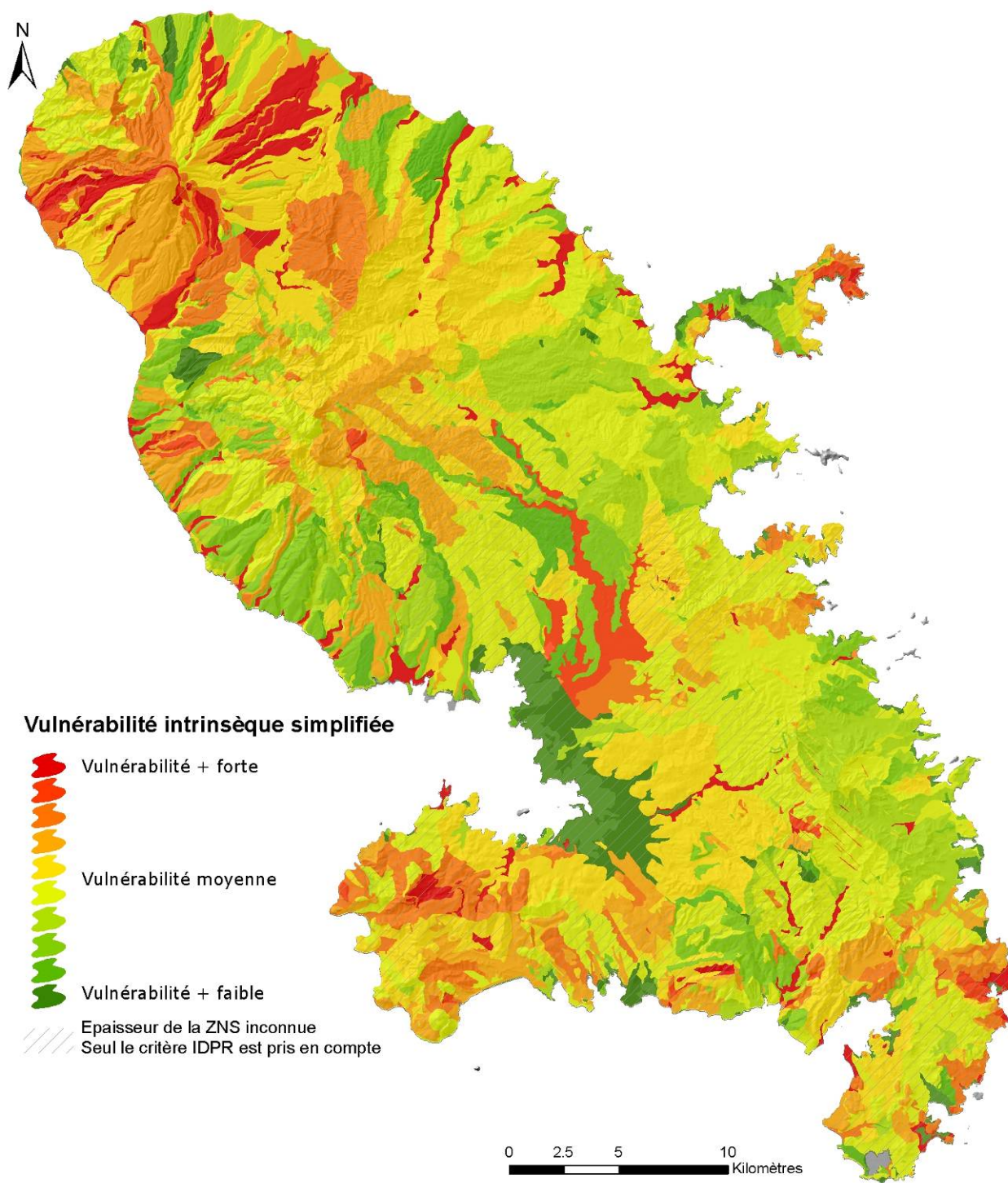


Figure 16: Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines

6. Conclusion

L'analyse cartographique menée dans cette étude permet de traiter les différentes bases de données disponibles sur l'ensemble du territoire à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) sous ArcGis® et de contribuer ainsi, à améliorer la connaissance de la vulnérabilité des eaux souterraines.

L'analyse de la vulnérabilité intrinsèque des premiers aquifères rencontrés a été menée sur la combinaison de trois critères : l'indice de développement et persistance des réseaux (IDPR), le type de nappe, et l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS).

Les résultats sont présentés sous forme cartographique, avec une fiche par masse d'eau. Globalement, on constate qu'environ la moitié des unités fonctionnelles présente une vulnérabilité moyenne, un quart une vulnérabilité plus forte et un quart une vulnérabilité plus faible.

Pour les systèmes aquifères pour lesquels la perméabilité et/ou le degré de fissuration sont connus ou pour lesquels les temps de transfert ont été approchés par une modélisation hydrodynamique, la carte de vulnérabilité obtenue confirme l'état de vulnérabilité supposé. La méthode de l'IDPR apparaît donc tout à fait adaptée à la réalisation de cartes de vulnérabilité intrinsèque en milieu volcanique.

Cette carte de vulnérabilité a ainsi vocation à devenir un véritable outil d'aide à la gestion et à la surveillance de la qualité des eaux souterraines.

Le critère le moins connu étant l'épaisseur de la zone non saturée, et les zones sans cette information étant non négligeables, cette cartographie pourra être mise à jour dès lors que suffisamment de nouveaux forages auront été réalisés dans les secteurs où cette information fait défaut.

La carte de vulnérabilité ne doit pas être interprétée comme le reflet d'une vulnérabilité absolue mais comme une hiérarchie entre les hydrosystèmes, qui permet de cibler les zones prioritaires en matière de protection de la ressource.

7. Bibliographie

BEZELGUES.S., DES.GARETS.E., MARDHEL.V., DORFLIGER.N., 2002, Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante – Guadeloupe Phase 1. RP-51783-FR

Bézèlques S, Mardhel V, Gravier A, 2006 Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante – Guadeloupe Phase 3. RP-53456-FR

Bézèlques S, Gravier A, Mardhel V, 2006 Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante – Guadeloupe Phase 4. RP-54339-FR

Brenot A, Vittecoq B, Allier D, Négrel P (2008). Caractérisation et différenciation géochimique des eaux souterraines de la Martinique. BRGM/RP-56266-FR.

Comte JP, Chargueron C, Lachassagne P, 2003, Domaines hydrogéologiques et prédélimitation des masses d'eau souterraine de la Martinique, BRGM RP-52688-FR.

Corbier.P., Mardhel.V., 2003 - Carte de vulnérabilité simplifiée des bassins versants de la région Pays de la Loire. Rapport BRGM/RP-53106-FR

Deffontaines B., (1990)- Développement d'une méthodologie morphonéotectonique – Analyse des surfaces enveloppes du réseau hydrographique et des MNT, Thèse, Université Paris VI, 225 pages, 1990.

Fairfield J. et Leymarie P., 1991- Drainage networks from grid Digital Elevation Models. Water resources Research, pp 709-717.

Gogu R.C., Dassargues A., 2000 - Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assesment using overlay and index methods, Environmental Geology, 39 (6), April, Springer-Verlag.

GOURDOL.L., BEZELGUES.S., MARDHEL.V., SCHOMBURGK.S., GRAVIER.A, 2004, Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante – Guadeloupe Phase 2. RP-52677-FR

Gravier A., Koch-Mathian J-Y, Mardhel V. et Nowak C., 2006 - Croisement des données des sites BASOL avec la vulnérabilité simplifiée des nappes du bassin Seine-Normandie, rapport de synthèse, BRGM/RP-54257-FR,

Jenson, S.K, et Domingue, J.O. 1998 - Extracting topographic structures from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric engineering and remote sensing, pp 1593-1600.

Kim W.G. 1978 - Analyse cartographique du bassin de Nak-Dong (Corée), Thèse, Université Bordeaux I, 95 pages, 1978.

Lacroix M., Martz L.W., Kite G.W. and Garbrecht J. 2002 - Using digital terrain analysis modelling techniques for the parameterization of a hydrologic model. Environmental Modelling and Software

Lawrence W. Martz and Jurgen Garbrecht, 1993 - Automated Extraction of Drainage Network and Watershed Data From Digital Elevation Models Volume 29, No. 6, pp. 901-908, December 1993

Machard de Gramont H., Mardhel V., Pointet T., Schomburgk S., en collaboration avec Caous J-Y., Caudron M., Corbier P., David-Rouxel E., Equilbey E., Ghyselinck M., Jauffret D., Maget Ph., Marchais E., 2003 - Etude de sensibilité aux remontées de nappes – Méthodologie et application à 20 secteurs tests de France métropolitaine. Rapport BRGM/RP-52340-FR

Mardhel V. ;, 2006 - Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines de la région Aquitaine. BRGM/RP-55311-FR

Mardhel V. , Frantar P., Uhan J., Mišo A., 2004 - Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia. International conference on groundwater vulnerability assessment and mapping. Ustroń, Poland, 15-18 June 2004., Poland 15 to 18 June 2004.

Mardhel V. et Gravier A., 2005 - Carte de vulnérabilité simplifiée du bassin Seine-Normandie. Rapport BRGM/RP- 54148-FR

Mardhel.V, Gravier.A, Koch Mathian.J.Y, Nowak.C, Terreyre.JL, Raguët.M, Garnier.C. 2006 Cartographie de la vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Application aux sites BASOL., in AIH - Gestion des grands aquifères - Dijon - France - 30/05-01/06/2006

Nowak C. et Mardhel V, 2005 - Croisement des données des sites pollués, ou susceptibles de l'être, de l'outil BASOL et des données sur les nappes du bassin Seine-Normandie, rapport intermédiaire BRGM/RP-53253-FR.

Prud'homme R., 1972 - Analyse morphostructurale appliquée en Aquitaine occidentale et au golfe de Gascogne - Définition d'une méthodologie cartographique interprétative, Thèse, Université Bordeaux I, 364 pages, 1972.

Razianoff S. 1989- Extraction et analyse automatique des réseaux à partir de MNT, Thèse, Université Paris VII, 89 pages, 1989.

Schnebelen N., Platel J.P., Le Nindre Y.M., et Baudry D et al 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.

Vernoux.J.F., Wuilleumier.A., Seguin.J.J., Dorfliger.N., Martin.A., 2007 - Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie. BRGM/RP-55332-FR

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, 221 p., 87 ill., 8 ann.

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

Annexe 1

Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères

1. 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 DRASTIC 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 1 ci-dessous. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

D : DISTANCE A LA NAPPE, EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE		R : RECHARGE (PLUIE EFFICACE)	
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		
A : NATURE DE LA ZONE SATURÉE		S : NATURE DU SOL	
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
T : TOPOGRAPHIE, PENTES		I : NATURE DE LA ZONE NON SATURÉE	
Valeurs en % de pente	Notation	Calcaire karstique	10
0 – 2	10	Basalte	9
2 – 6	9	Sable et gravier	8
6 – 12	5	Sable et gravier avec silt et argile	6
12 – 18	3	Calcaire lité, grès, shale	6
> 18	1	Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/Argile	1
C : PERMEABILITE			
		> 9,4. 10 ⁻² m/s	10
		4,7.10 ⁻⁴ – 9,4.10 ⁻³ m/s	8
		32,9.10 ⁻⁵ – 4,7.10 ⁻⁴ m/s	6
		14,7.10 ⁻⁵ – 32,9.10 ⁻⁵ m/s	4
		4,7.10 ⁻⁶ – 14,7.10 ⁻⁵ m/s	2
		4,7.10 ⁻⁷ – 4,7. 10 ⁻⁶ m/s	1

La méthode DRASTIC (d'après Lallemant-Barrès, 1994) propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'occupation du sol : 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

La méthode DRASTIC est principalement utilisée pour la cartographie à petite échelle (Lyakhloufi *et al.* 1999).

2. SINTACS

Elle est dérivée de la méthode DRASTIC, 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 (Petelet *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;
- T : Tipologia della Copertura (sol) ;
- A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero ;
- C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- S : Acclività della Superficie Topographica

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 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.

3. AVI

Développée par l'institut de recherche de recherche national d'hydrologie (National Hydrology Research Institute - NHRI) à Saskatoon, Saskatchewan (Canada), la méthode de l'index de vulnérabilité des couches aquifères (Aquifer Vulnerability Index - AVI) détermine un critère de protection des eaux souterraines. Cette technique a été appliquée à une partie de la région frontalière entre le Saskatchewan et l'Alberta (Van Stempvoort, et d'Al, 1992), elle a impliqué la compilation de la stratigraphie, de l'identification des couches aquifères, et du calcul de l'AVI pour environ 2.000 points d'eau disponibles sur ce secteur pilote.

AVI mesure la vulnérabilité selon la résistance hydraulique (c) à l'écoulement vertical de l'eau opposée par les formations géologiques situées au-dessus de la couche aquifère. La résistance hydraulique est calculée à partir de l'épaisseur (d) de chaque couche sédimentaire et de la conductivité hydraulique (k) de chacune de ces couches. *Résistance hydraulique, $c = \sum D_i / K_i$, pour les couches de 1 à i.*

Dans ce type d'approche, des valeurs hydrauliques saturées de conductivité (Ksat) sont assignées à chaque couche sédimentaire rapportée par point. Ces valeurs sont souvent établies à partir de valeurs typiques issues de recherches bibliographiques.

L'épaisseur des différentes couches sédimentaires découle de l'étude des ouvrages existants sur le territoire de l'étude. La résistance hydraulique (c) a la dimension du temps (par exemple en années) et représente le flux-temps par gradient d'unité pour l'eau s'infiltrant au travers des diverses couches de sédiment vers la couche aquifère saturée.

Une résistance hydraulique (c) faible, suppose une vulnérabilité importante, à contrario, (c) élevée suppose une vulnérabilité faible. Une carte de vulnérabilité peut être déduite en calculant le logarithme10 de la résistance hydraulique (notation c) pour chacun des points inventoriés. Les surfaces résultantes (par interpolation des points, à fortiori pour un milieu supposé homogène) représentent les secteurs de résistance différente. Elles sont groupées par catégories de vulnérabilité :

Résistance hydraulique, c (années)	Notation (c)	Catégorie de vulnérabilité
< 10 ans	< 1	vulnérabilité extrêmement élevée
10 -100 ans	1 à 2	vulnérabilité élevée
100 -1000 ans	2 à 3	vulnérabilité modérée
1000 -10000 ans	3 à 4	basse vulnérabilité
> 10.000 ans	> 4	vulnérabilité extrêmement basse

4. EPIK

C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensu-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 (l'épikarst ou zone épikarstique rassemble l'eau d'infiltration dans un aquifère perché local et discontinu, drainé par la bas soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides de petites dimensions, en une infiltration lente)
- 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).

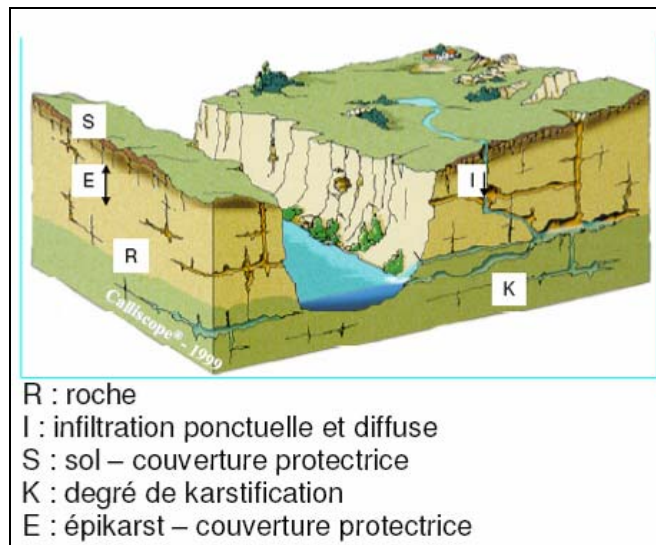
L'indice final de vulnérabilité est calculé (facteur de protection) en chaque maille du système selon la formule : $F = \alpha Ei + \beta Pj + \gamma Ik + \delta Kl$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficients de pondération des critères ;

Ei, Pj, Ik, Kl : valeur de chacun des critères indexés.

5. 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. 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 (I_g) obtenu en chaque pixel de la zone d'étude est divisé en 5 classes égales (0 à 4) allant du moins au plus vulnérable.

Le calcul de l'indice global de vulnérabilité I_g se fait selon la formule :

$$I_g = \alpha Ri + \beta Ij + \delta Sk + \gamma Kl + \varepsilon Em$$

$\alpha, \beta, \delta, \gamma, \varepsilon$: poids des critères RISKE ;

i, j, k, l, m : indices des critères RISKE

6. DISCO

La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Elle est basée sur une évaluation de la vulnérabilité intrinsèque prenant en considération les facteurs géologiques et hydrogéologiques conditionnant le fonctionnement de l'aquifère fissuré et le transport des polluants.

Trois paramètres sont jugés nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant d'un point quelconque du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage

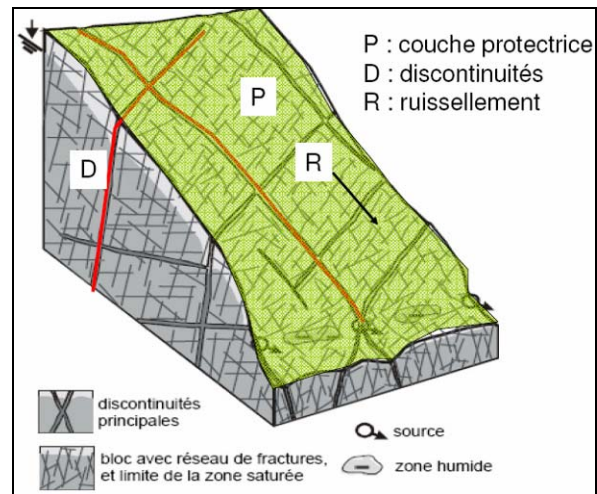
L'importance relative de ces différents paramètres et le mode de combinaison reposent sur des études de cas pratiques sur le terrain.

L'évaluation de l'influence combinée de ces trois paramètres (D,P,R) permet de déterminer un facteur de protection naturel en tout point du bassin d'alimentation.

- D : le paramètre "discontinuités" prend en considération le transit de l'eau à l'intérieur de l'aquifère fissuré entre un point d'infiltration sur le bassin d'alimentation et le captage (p. ex. : zone fracturée fortement perméable en connexion rapide avec le captage ; secteur peu fracturé),

- P : le paramètre "couverture protectrice" traduit l'effet protecteur des formations géologiques sur montant l'aquifère (sol, dépôts quaternaires),

- R : le paramètre "ruissellement" englobe les phénomènes d'écoulement de l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires).



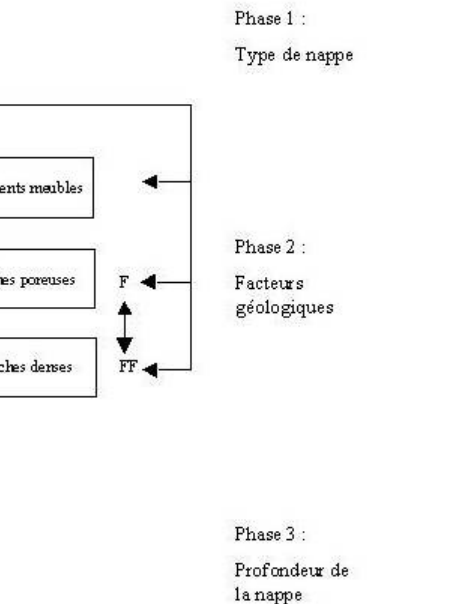
7. GOD

Développée par Foster en 1987, elle 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.



la couverture de sol
auteurs, ainsi que la
tableau suivant. On

Paramètres	Classes				Poids
Pente	0 - 5 % (5)	5 - 10 % (2)	10 - 15 % (1)	> 15 % (1)	1/2
Epaisseur couverture	< 5 m (1)	5 - 2 m (3)	2 - 1 m (5)	< 1 m (5)	-
Perméabilité couverture ou de l'affleurement	> 10 ⁻⁴ (25)	> 10 ⁻⁴ .10 ⁻⁶ (5)	10 ⁻⁶ .10 ⁻⁹ (3)	10 ⁻⁹ (2)	1
Perméabilité sous-sol non saturé	> 10 ⁻⁴ (25)	> 10 ⁻⁴ .10 ⁻⁶ (5)	10 ⁻⁴ .10 ⁻⁹ (3)	< 10 ⁻⁹ (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)	-

J. Ricour (1988)

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. 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).

	Paramètre	Poids global	— Echelle de vulnérabilité croissante et poids relatifs de chaque paramètre → +			
Carte de vulnérabilité	Lithologie et recouvrement	1	Argile sur craie	Alluvions sur craie	Limons sur craie	Craie en affleurement
			0	1	2	3
	Topographie	0,5	Pente > 10 %	5 < pente ≤ 10 %	1 < pente ≤ 5 %	pente ≤ 1 %
			1	2	3	4
	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			
			1			
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...	

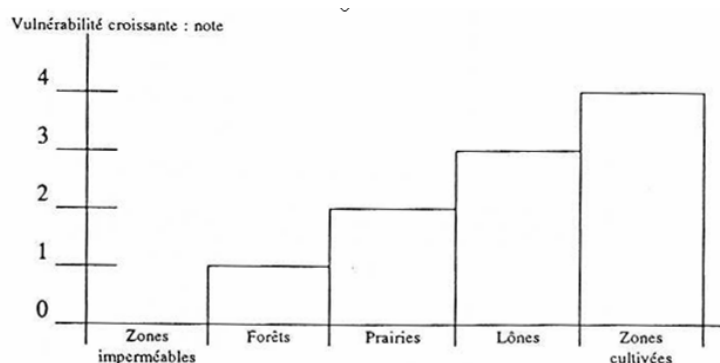
S. Munoz, C. Langevin (1991)

S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991), pour élaborer les cartes de vulnérabilité au Guatemala, retiennent les paramètres explicités dans le tableau suivant :

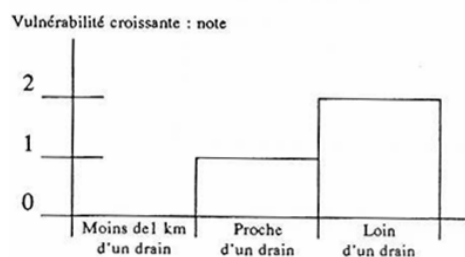
Images	Variables Paramètres	Echelle de vulnérabilité et poids relatif de chaque paramètres										Poids Global
		(Très vulnérable)						(Peu vulnérable)				
Zone non saturée	Epaisseur	< 10 m		10-20 m		20-30 m		30-50 m		> 50 m		5
	Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 5	Initiale 3	Finale 15	Initiale 10	Finale 50	Initiale 25	Finale 125	Initiale 50	Finale 250	
Zone de recharge	Type de milieu					de recharge		hors zone de recharge		urbain		3
	Valeur attribuée											
		Initiale 1	Finale 3	Initiale 10	Finale 30	Initiale 25	Finale 75					
Densité de drainage	Degré de perméabilité	très perméable		perméable		semi-perméable		ruisselant		très ruisselant		2
	Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 2	Initiale 2	Finale 4	Initiale 3	Finale 6	Initiale 10	Finale 20	Initiale 25	Finale 50	
Fracturation	Niveau probable de fracturation					très fracturé		peu fracturé				1
	Valeur attribuée											
		Initiale 1	Finale 1	Initiale 25	Finale 25							

M.F. Suais (1990)

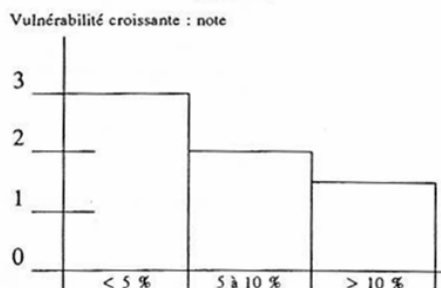
Dans l'étude de M.F. Suais (1990) où les critères de vulnérabilité sont assimilés aux critères d'évaluation des risques de pollution, on peut retenir la proposition de nouveaux critères relatifs aux sols, qui sont des critères non plus stables, mais variables dans le temps ou par intervention humaine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



Densité de drainage



Pentes



Annexe 2

Corrélations entre la forme du réseau hydrographique et les formations géologiques

La recherche d'éventuelles corrélations entre la forme du réseau hydrographique et les formations géologiques a suscité un grand nombre de travaux. L'hypothèse principale qui les sous-tend suppose que les réseaux hydrographiques conservent, dans leurs formes, la signature des phénomènes endogènes (Deffontaines (B.)) ou exogènes.

Prud'homme Robert³ est l'un des précurseurs français en matière d'analyse des réseaux hydrographiques. Dans sa thèse, il montre l'intérêt de ces types d'analyse pour les études géologiques, car "les caractères du réseau hydrographique sont extrêmement dépendants au cours de leur évolution de l'état du bassin versant", et ajoute : "les trois paramètres dont les variations nous semblent les plus importantes dans l'étude des réseaux hydrographiques sont la topographie, les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol". Prud'homme Robert expérimente donc l'analyse cartographique des réseaux hydrographiques et donne un certain nombre de corrélations très pertinentes. Kim Woo-Gwan⁴, poursuit les travaux de Prud'homme et consacre à l'analyse des réseaux hydrographiques une grande partie de son travail.

Deffontaines⁵ établit des corrélations et insiste sur l'intérêt du réseau hydrographique pour une approche morphostructurale : "Le réseau hydrographique est principalement modifié par la lithologie et la fracturation".

Riazanoff⁶ propose des méthodes automatiques d'extraction et d'analyse de réseaux hydrographiques, en faisant apparaître quelques corrélations qui ouvrent les portes à une analyse automatisée et informatique du réseau hydrographique.

Enfin, très récemment, Delcaillau⁷ étudie la morphométrie des principaux bassins versants de Taiwan à l'aide des réseaux hydrographiques, pour approcher géomorphologiquement la genèse de cette île en cours de formation.

Les travaux de ces différents auteurs montrent que le tracé du réseau hydrographique résulte d'interactions complexes. Si l'eau par nature est incompressible et s'écoule par le chemin le plus court du point haut (sommet, crête,...) au point bas (mer, lac, fleuve...), durant son parcours, les conditions de son cheminement influent sur son tracé.

Parmi ces facteurs, les causes d'origines uniquement géologiques sont nombreuses et peuvent se décomposer de la manière suivante :

³ Prud'homme (R.) (1972), *Analyse morphostructurale appliquée en Aquitaine occidentale et au golfe de Gascogne - Définition d'une méthodologie cartographique interprétative*, Thèse, Université Bordeaux I, 364 pages, 1972.

⁴ Kim (W.G.) (1978), *Analyse cartographique du bassin de Nak-Dong (Corée)*, Thèse, Université Bordeaux I, 95 pages, 1978.

⁵ Deffontaines (B.) (1990), *Développement d'une méthodologie morphonéotectonique - Analyse des surfaces enveloppes du réseau hydrographique et des MNT*, Thèse, Université Paris VI, 225 pages, 1990.

⁶ Razianoff (S.) (1989), *Extraction et analyse automatique des réseaux à partir de MNT*, Thèse, Université Paris VII, 89 pages, 1989.

⁷ Delcaillau (B.) (1997), *Les fronts de chaîne active - Genèse des reliefs et relations tectonique -érosion-sédimentation*, Thèse, Université de Caen, 300 pages, 1997.

▪ **La lithologie**

La lithologie est l'étude de la nature des roches issues d'une formation géologique. La nature des roches intervient dans les modifications du relief.

- la nature physique : épaisseur, dureté, compacité, perméabilité, porosité.
- la nature chimique : sensibilité à la dissolution, qualité des eaux interstitielles, phénomènes de cristallisation ou de diagenèse.

En fonction de la lithologie, le comportement du réseau et son organisation vont être différents.

▪ **La structure**

La géologie structurale (ou tectonique régionale) s'attache à l'étude des déformations des roches. Elle s'intéresse à l'agencement originel des roches, incluant les pendages. Les alternances géologiques, les discordances, les déformations en cours ou phénomènes néotectoniques affectent la lithosphère et modifient la topographie et façonnent considérablement le réseau hydrographique.

D'autres facteurs interviennent et sont la résultante d'une combinaison de contraintes de nature diverse. Leur importance diffère selon l'échelle à laquelle on observe le réseau hydrographique.

▪ **La pente régionale**

La pente régionale est définie par un sens, une direction puis une inclinaison. La pente est un élément déterminant dans l'orientation et l'organisation des cours d'eau.

▪ **Le rajeunissement**

Le rajeunissement est le début d'un nouveau cycle d'érosion. Il y a alors une reprise de l'érosion sur un relief pénéplané ou aplani, par abaissement du niveau aval des cours d'eau ou par surrection du niveau amont. Le déclenchement d'un tel phénomène a lieu lors d'une augmentation de la pente longitudinale du cours d'eau qui accroît sa dynamique et rompt son profil d'équilibre.

L'eustatisme est le phénomène responsable des variations générales du niveau moyen des mers. De telles variations agissent sur le potentiel érosif d'un cours d'eau et donc sur sa morphologie. Ainsi, l'eustatisme est l'une des causes du rajeunissement.

Annexe 3

Fiches par masses d'eau



Vulnérabilité des eaux souterraines

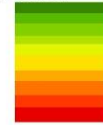
Masse d'eau souterraine : Sud Atlantique



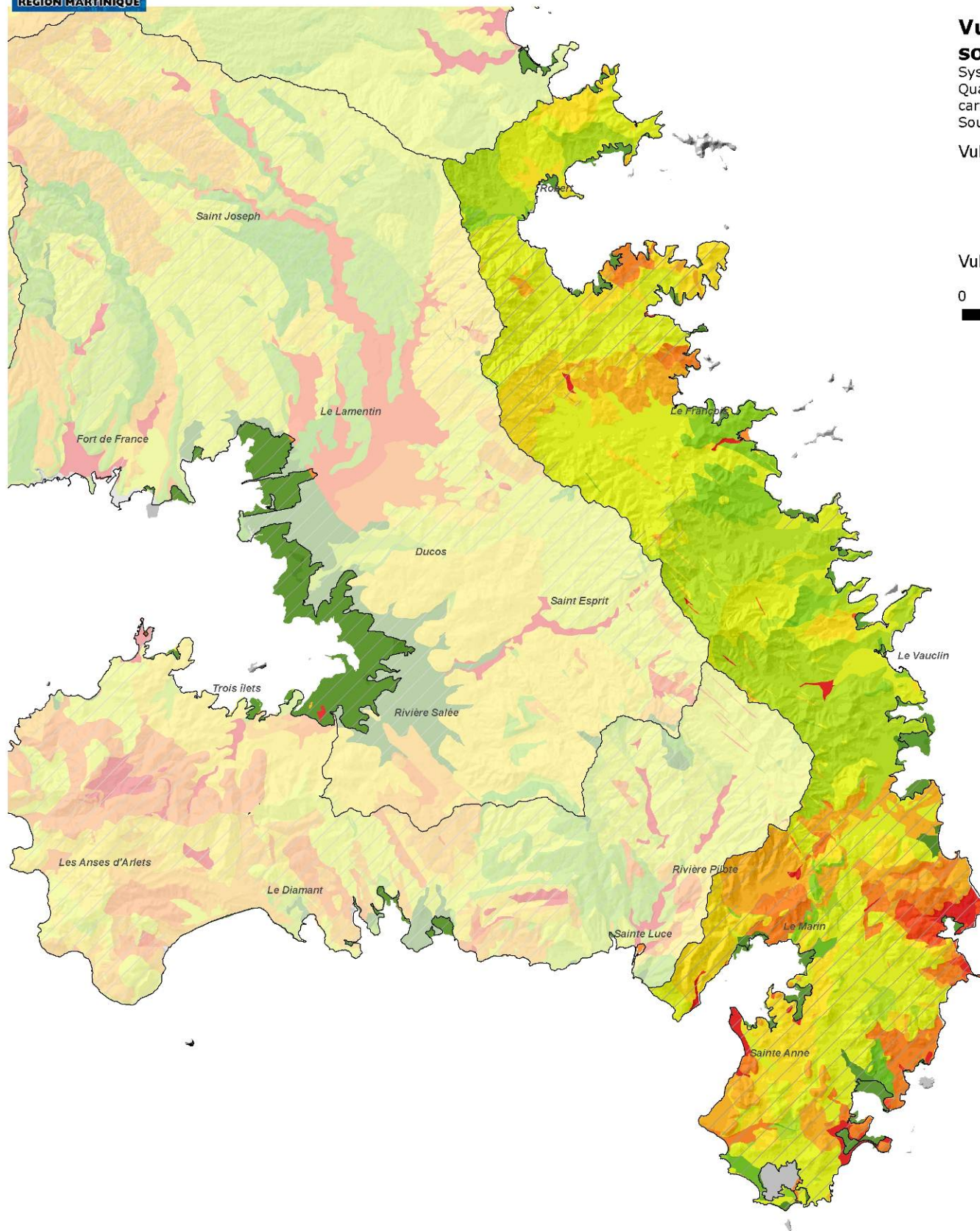
Vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique

Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique :
Qualité et vulnérabilité des eaux souterraines, synthèse
cartographique générale
Source : Carte établie le 20/03/2008 par le BRGM (www.brgm.fr)

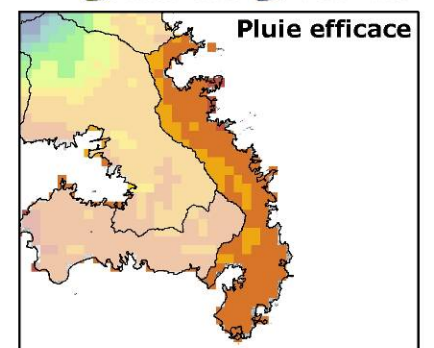
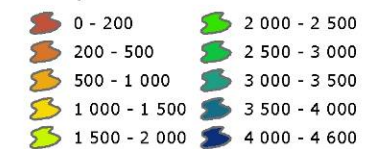
Vulnérabilité plus faible



Vulnérabilité plus forte



Pluie efficace moyenne annuelle (mm)
sur la période 1986-1997

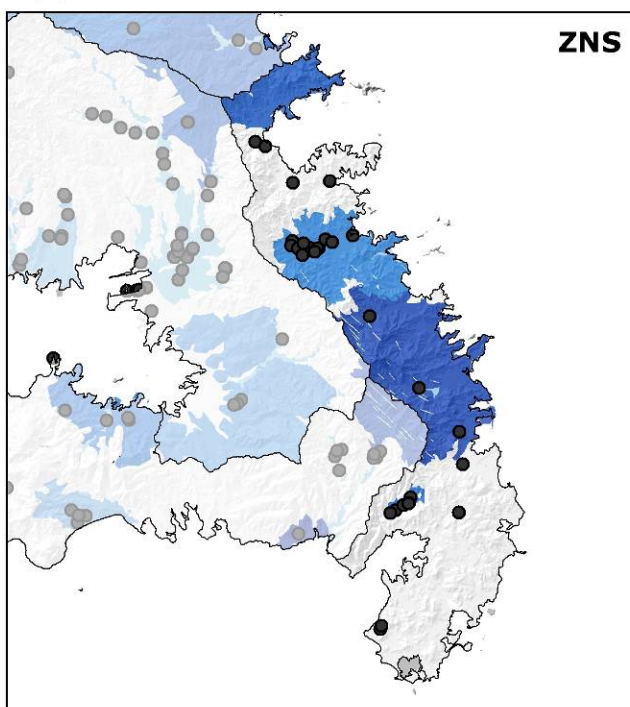


• Forages existants

Hierarchisation de l'épaisseur de la ZNS

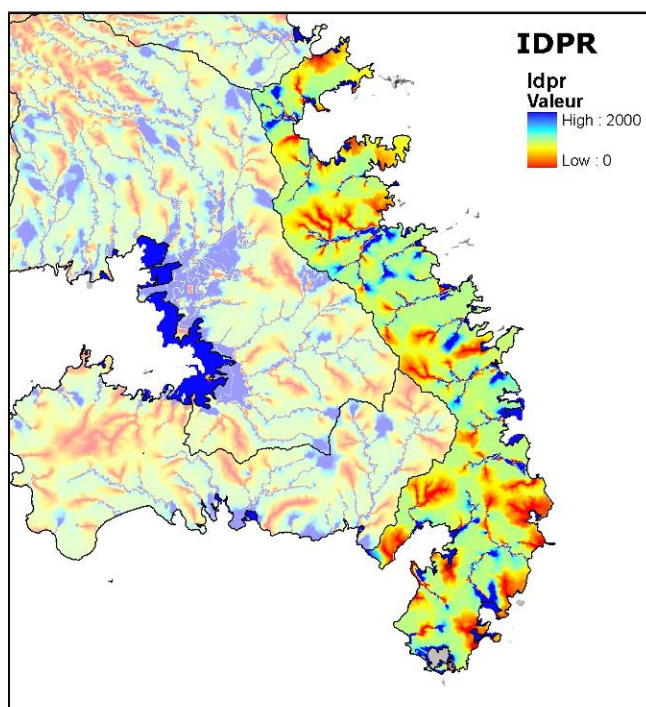


□ Pas de données

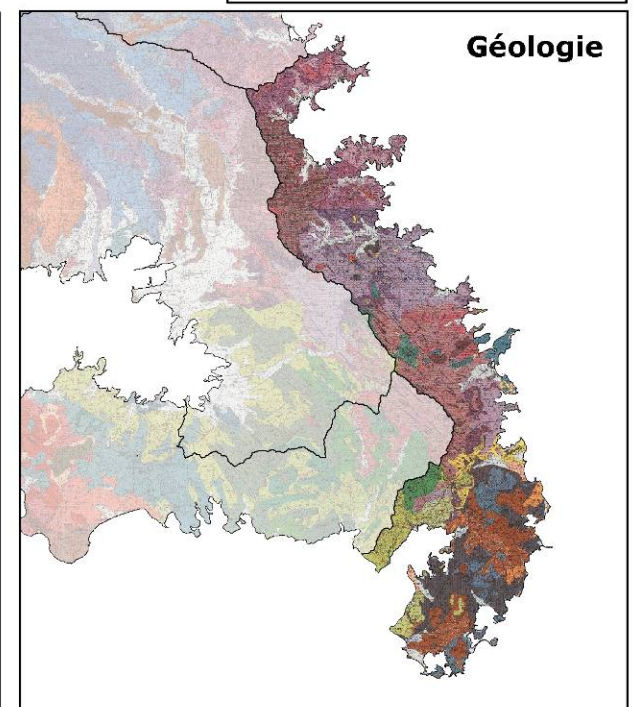


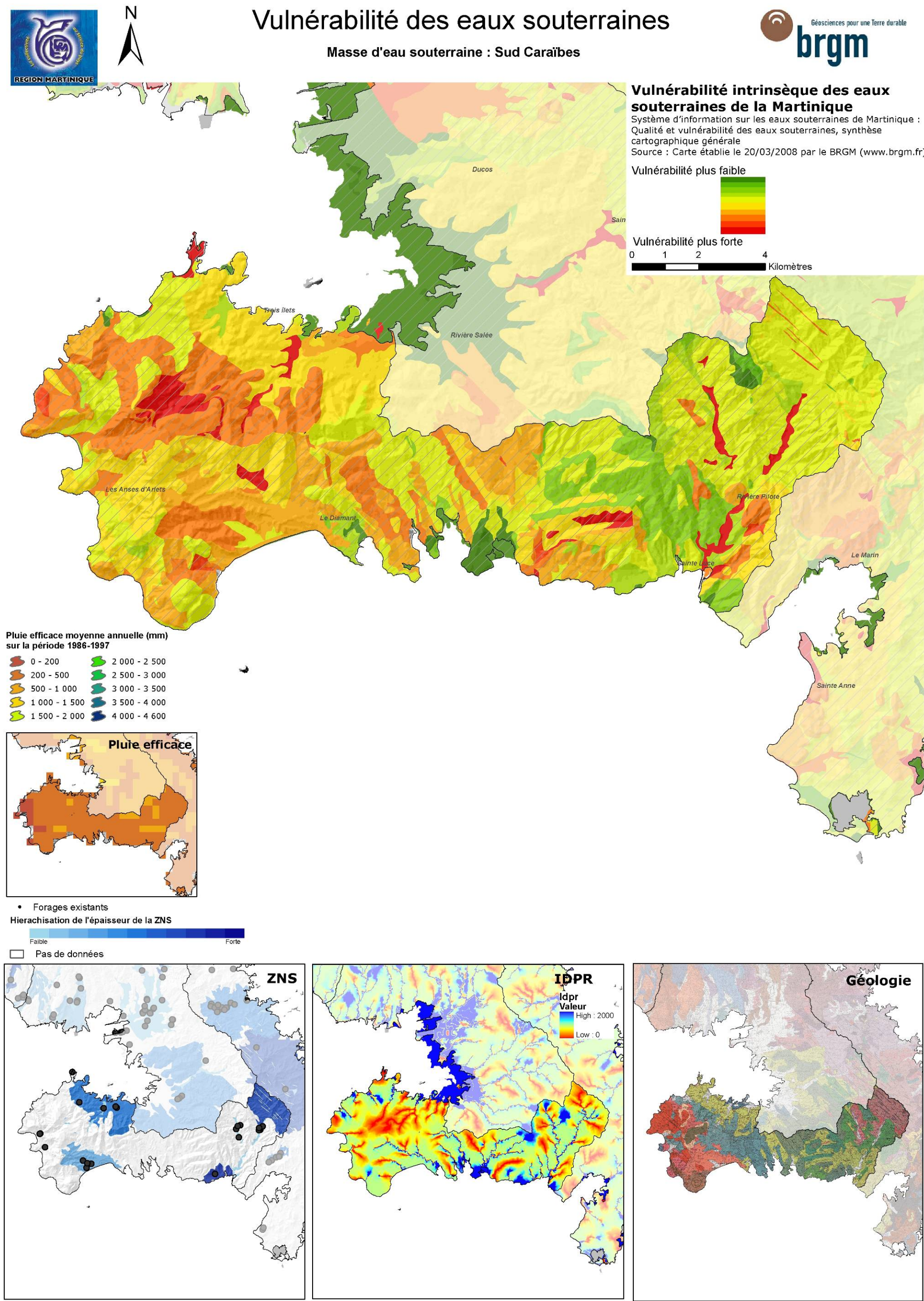
ZNS

IDPR



Géologie







Vulnérabilité des eaux souterraines

Masse d'eau souterraine : Centre



Vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique

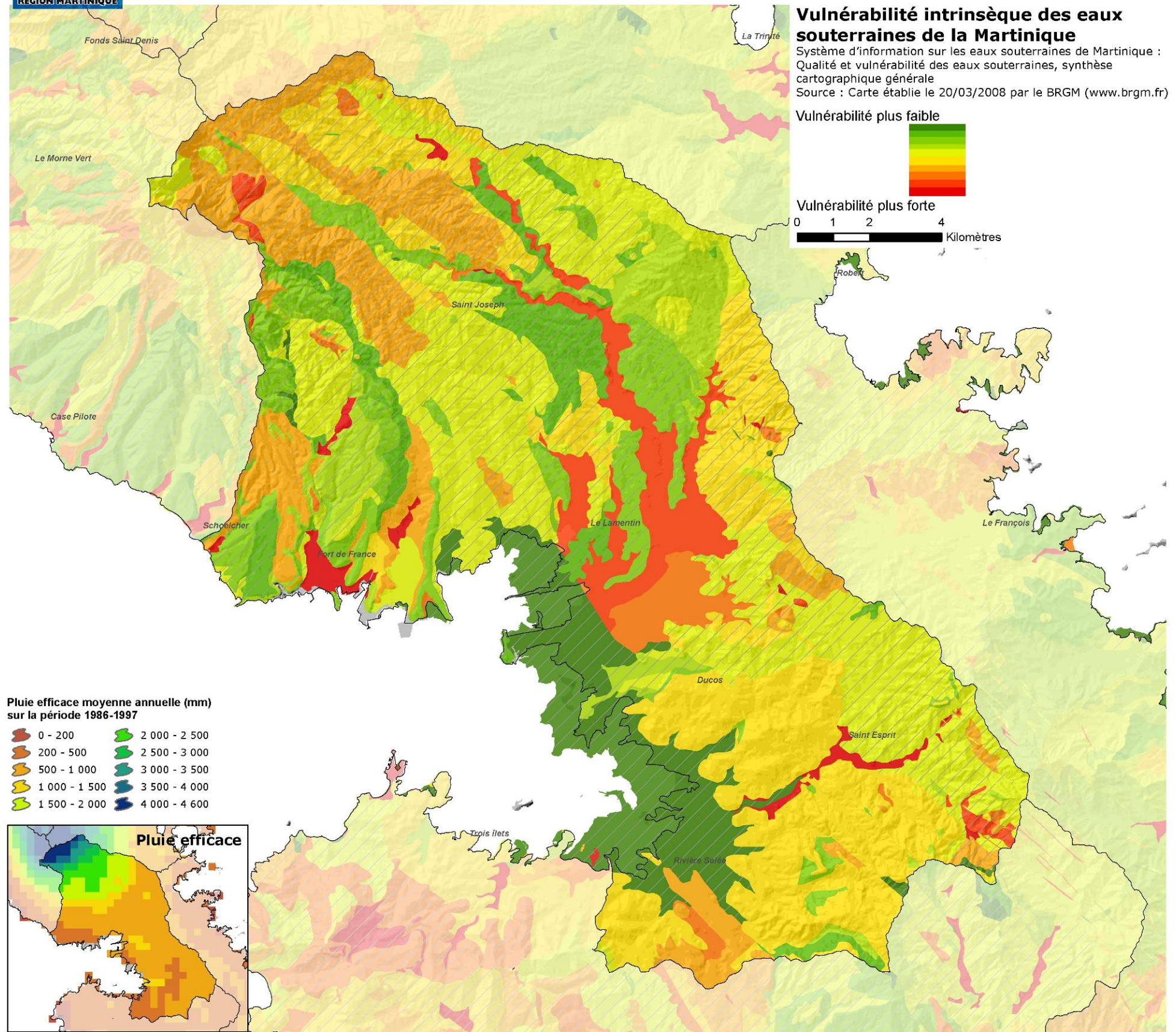
Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique :
Qualité et vulnérabilité des eaux souterraines, synthèse
cartographique générale
Source : Carte établie le 20/03/2008 par le BRGM (www.brgm.fr)

Vulnérabilité plus faible



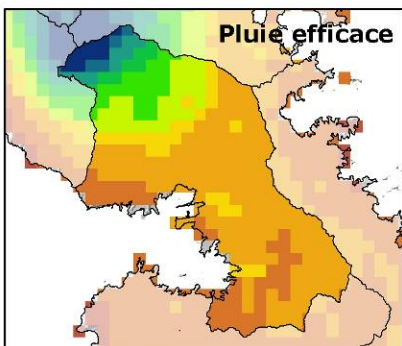
Vulnérabilité plus forte

0 1 2 4 Kilomètres



**Pluie efficace moyenne annuelle (mm)
sur la période 1986-1997**

0 - 200	2 000 - 2 500
200 - 500	2 500 - 3 000
500 - 1 000	3 000 - 3 500
1 000 - 1 500	3 500 - 4 000
1 500 - 2 000	4 000 - 4 600

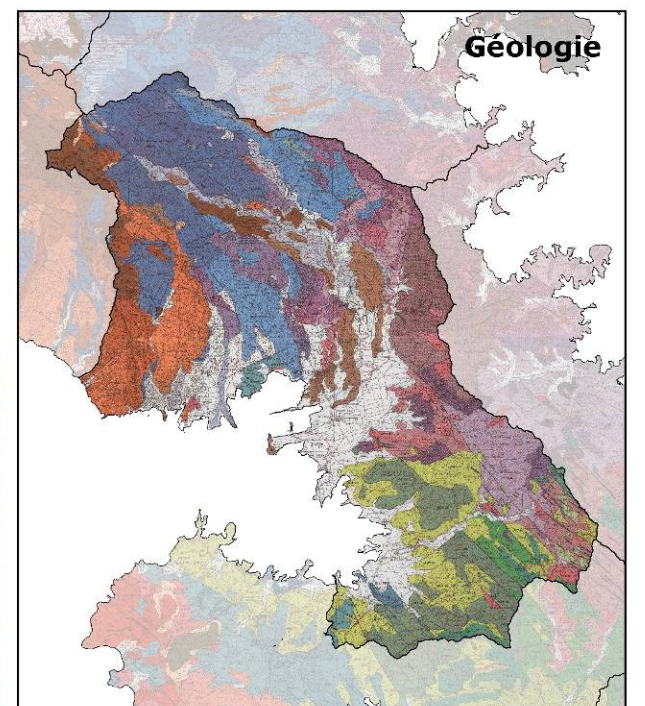
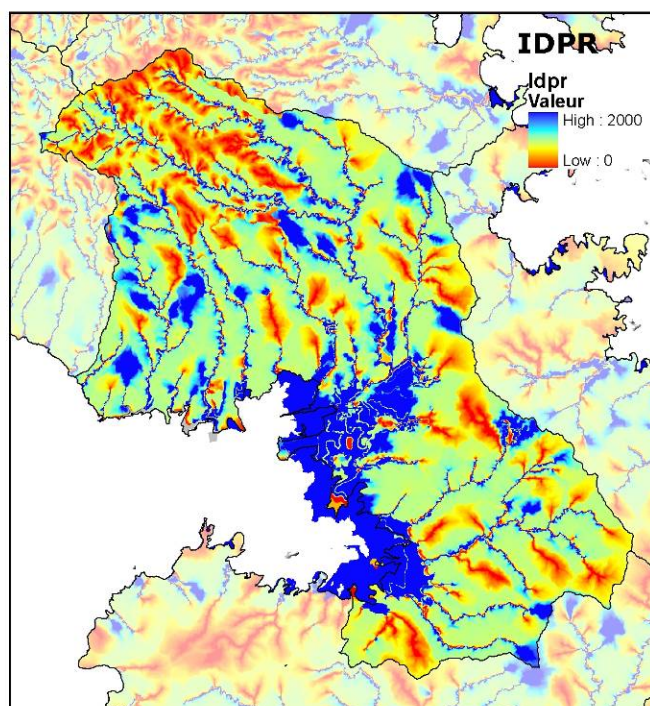
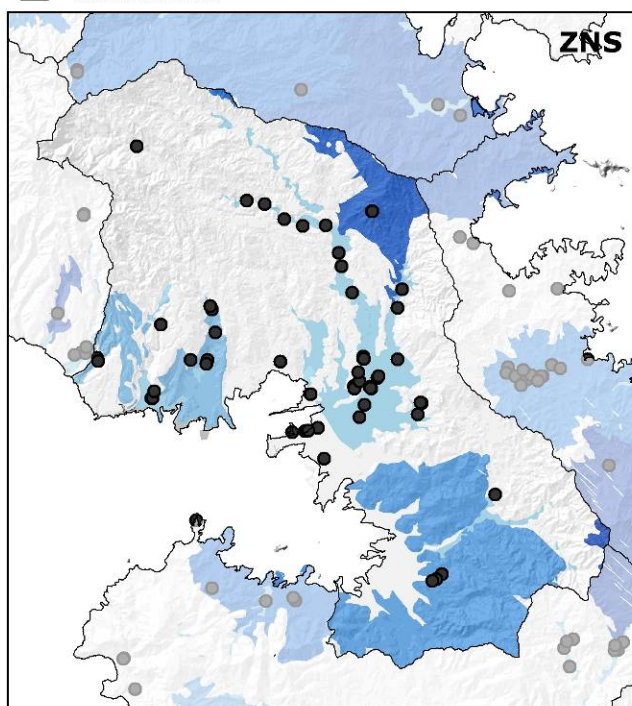


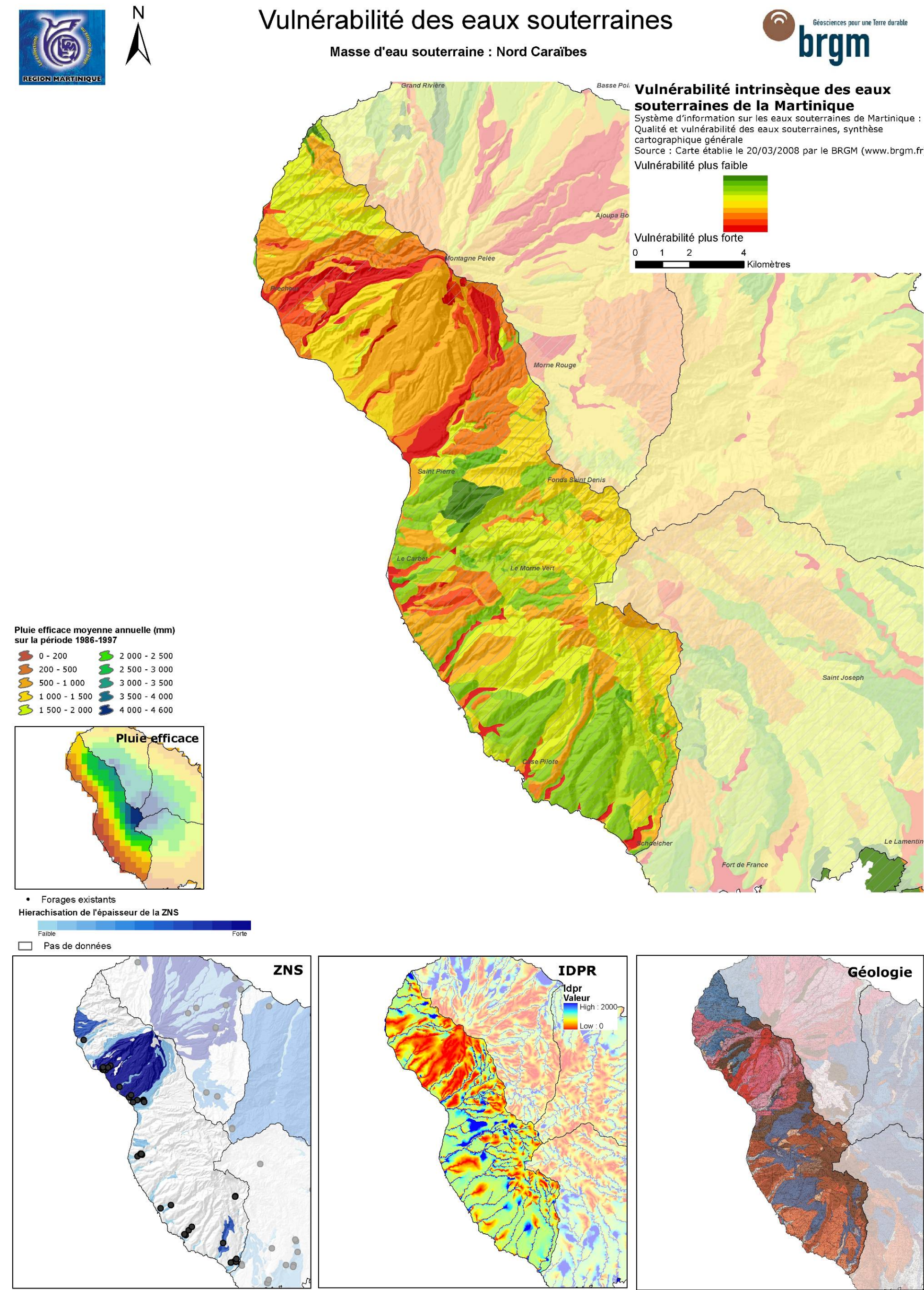
• Forages existants

Hierarchisation de l'épaisseur de la ZNS



□ Pas de données







Vulnérabilité des eaux souterraines

Masse d'eau souterraine : Nord



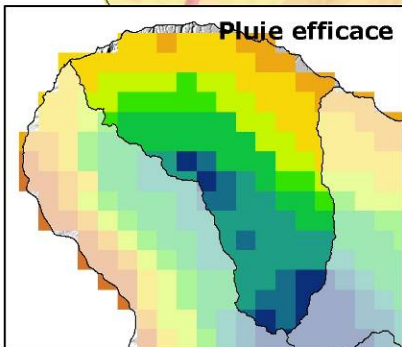
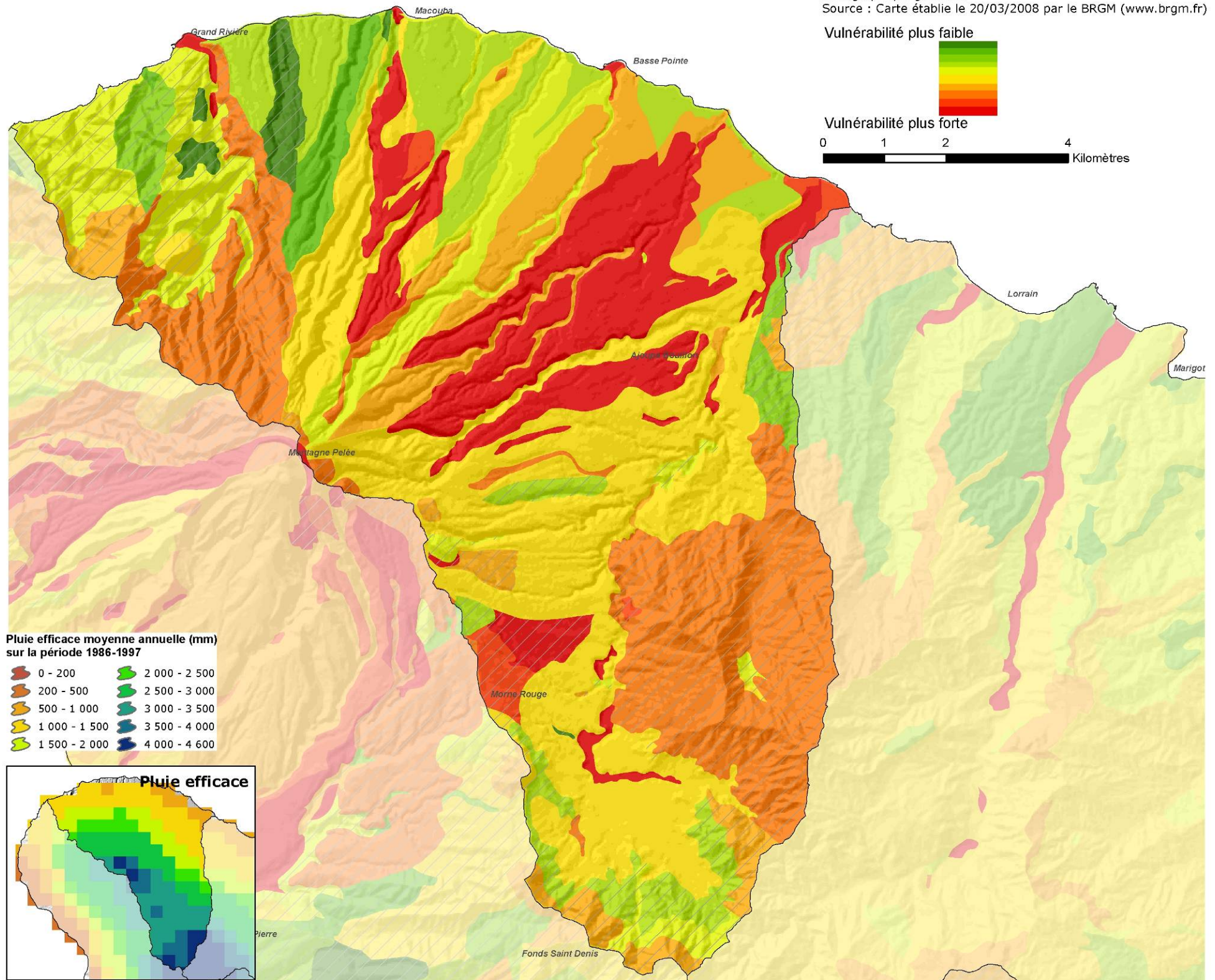
Vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique

Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique :
Qualité et vulnérabilité des eaux souterraines, synthèse
cartographique générale
Source : Carte établie le 20/03/2008 par le BRGM (www.brgm.fr)

Vulnérabilité plus faible



Vulnérabilité plus forte

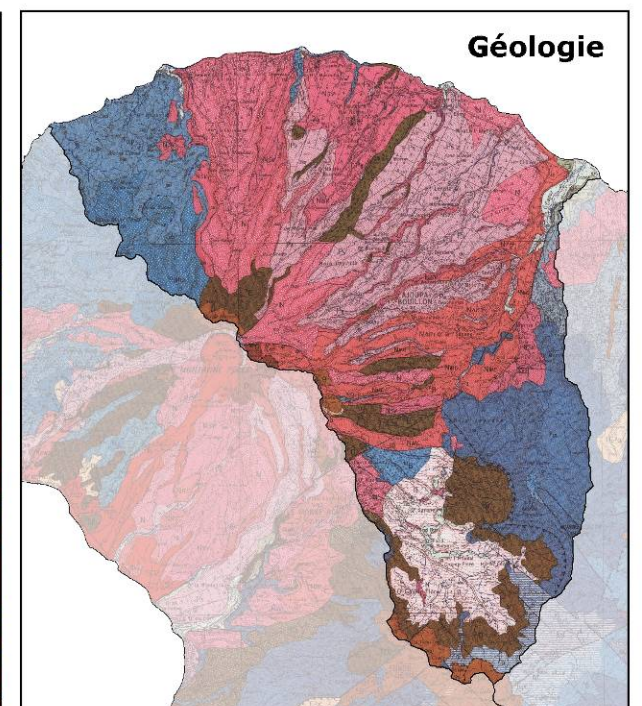
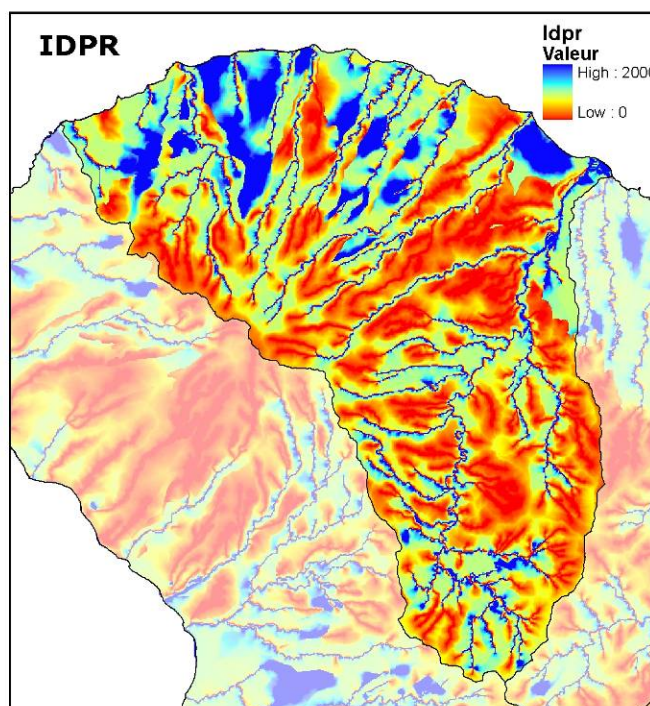
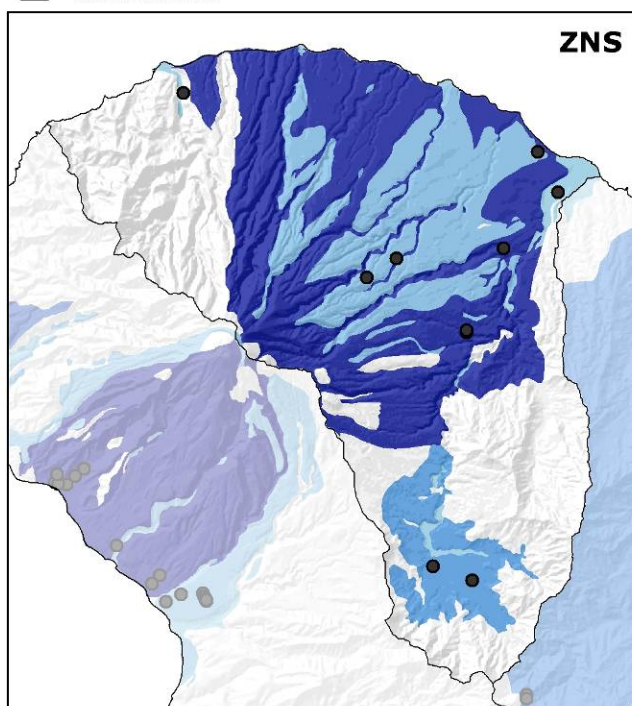


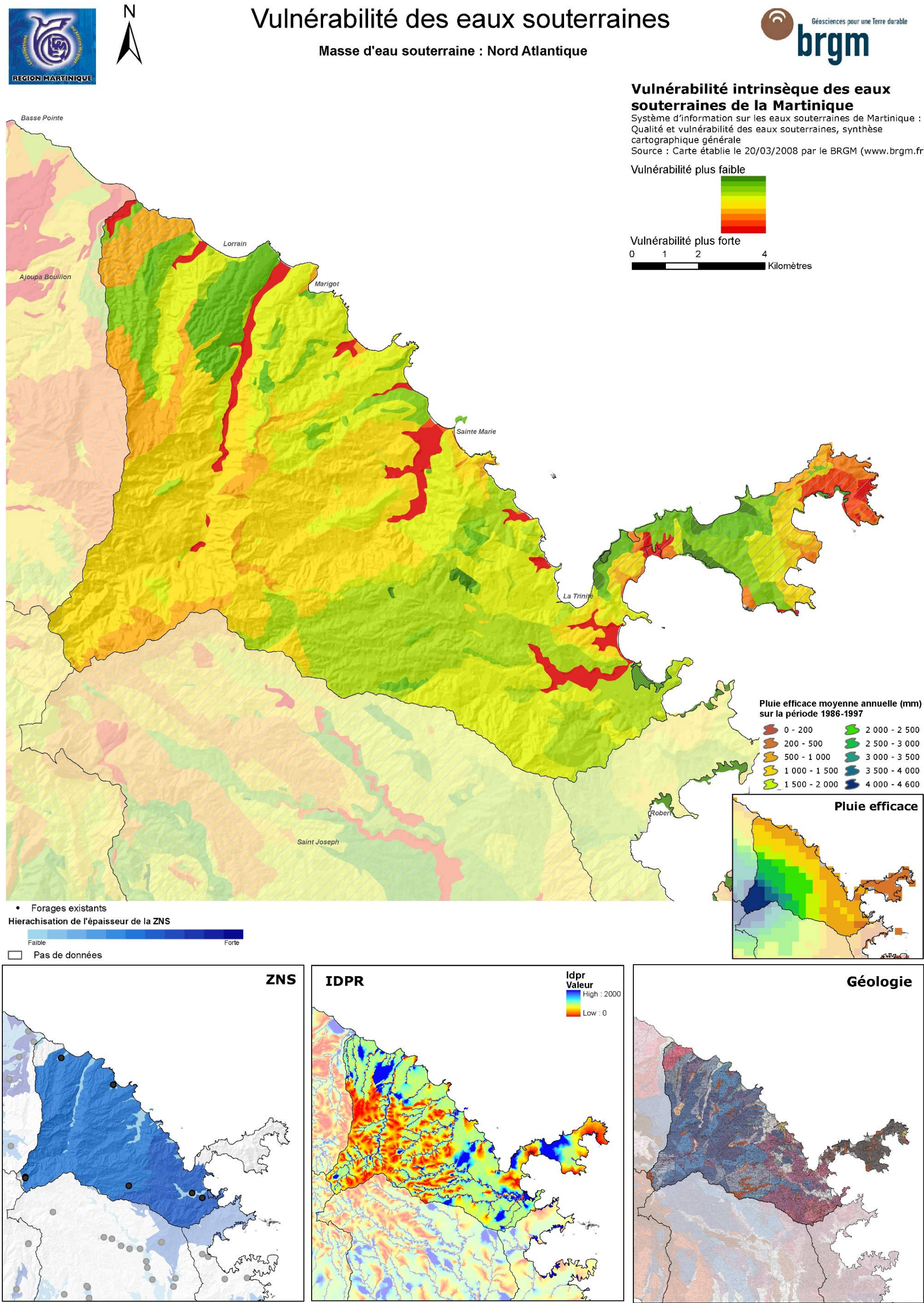
- Forages existants

Hierarchisation de l'épaisseur de la ZNS



□ Pas de données







Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Martinique
4, Lot. Miramar
Route Pointe des Nègres
97200 – Fort De France - Martinique
Tél. : 05 96 71 17 70