

Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères de Martinique

Benoît Vittecoq, Delphine Allier et Vincent Mardhel¹.

Vulnérabilité et risque

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 »². Autrement dit, la vulnérabilité est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel déterminant la sensibilité des eaux souterraines à la pollution.

La pollution de l'eau souterraine est une altération qui la rend impropre à l'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, ce qui conduit à la notion de **vulnérabilité** dite **spécifique**. De fait, nous utiliserons la notion de vulnérabilité intrinsèque qui, contrairement à la vulnérabilité spécifique, est indépendante des interactions du polluant avec le milieu.

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 l'échelle de travail, soit le 1/50 000) alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. La vulnérabilité intrinsèque traduit ainsi la capacité du premier réservoir souterrain à recevoir les eaux issues de la surface, transfert qui s'effectue d'abord à travers la zone non saturée (ZNS) avant d'atteindre la zone saturée. La ZNS est définie comme la zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre ; elle correspond ainsi à la zone d'infiltration de l'aquifère.

Le **risque** correspond quant à lui à la probabilité qu'un effet indésirable se réalise dans des conditions d'exposition données. Ce n'est pas tant la présence de

polluants qui pose problème mais le fait que cette pollution soit mobilisable et donc qu'elle risque de porter préjudice à des enjeux. La cartographie d'un risque, pour un polluant ou une famille de polluants, nécessite donc le croisement d'une carte de vulnérabilité, d'une carte des enjeux et d'une carte des pressions.

La recherche et l'exploitation des eaux souterraines est actuellement en plein développement en Martinique. Le Conseil régional de la Martinique et la DIREN ont ainsi souhaité disposer d'outils d'évaluation quantitative et qualitative de la ressource, et notamment de cartes de vulnérabilité des eaux souterraines comme un des outils d'aide à la gestion. La méthode présentée dans cet article a ainsi été appliquée et les résultats ont été compilés au sein du rapport BRGM/RP-56283-FR (Allier *et al.*, 2008).

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 et 2000). 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 terrain. 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). Toutes ces méthodes supposent l'intégration de nombreuses données dont l'acquisition, à l'échelle régionale, demande un investissement en temps et ressource difficilement mobilisable.

Méthodologie

La méthode du BRGM a été utilisée en prenant en compte les deux critères suivants : l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) et l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS). L'IDPR 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. Concernant l'épaisseur de la ZNS, dans un milieu

1. BRGM Service Eau, BP 36009, 45060 Orléans Cedex.

2. Définition retenue par le Comité National Français des Sciences Hydrologiques (CNFSH).

continu ou assimilé continu, la vulnérabilité de l'aquifère diminue avec la profondeur à laquelle il se trouve.

L'IDPR se fonde sur l'analyse des réseaux hydrologiques et celle du modèle numérique de terrain. Il 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 de 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 (Bezelgues *et al.*, 2002, 2006a, 2006b, Gourdol *et al.*, 2004).

La méthode indirecte basée sur l'IDPR 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 (www.eu-footprint.org) dans le cadre du développement d'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.

Calcul de l'IDPR

L'idée qui sous-tend l'IDPR découle de l'observation que l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent. Dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, de perméabilité nulle, seule la pente et la morphologie des reliefs guident la mise en place des cours d'eau. La recherche des talwegs ou lignes de plus grande pente qui, par la gravité, rassemblent les eaux de ruissellement, doit donc conduire à la reproduction du réseau hydrographique. Or, dans la réalité, ce réseau hydrographique théorique diffère du réseau réel qui est influencé par les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol.

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. À 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 (Fig. 1) 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 réel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (de persistance des réseaux, PR). L'IDPR présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux et 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 réel au réseau de talwegs calculés.

Le réseau hydrographique

La BD Carthage, réalisée par la DIREN en 2008 n'étant pas disponible au moment de l'élaboration du calcul de l'IDPR, le réseau hydrologique naturel utilisé provient des données de la BD TOPO IGN© version 1.2. 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 (cours d'eau artificiel ou non) et la source des données (issue de photogrammétrie par exemple). Après concertation avec la DIREN, et compte tenu de l'échelle de travail (1/50 000), les différences entre la BD TOPO et la BD

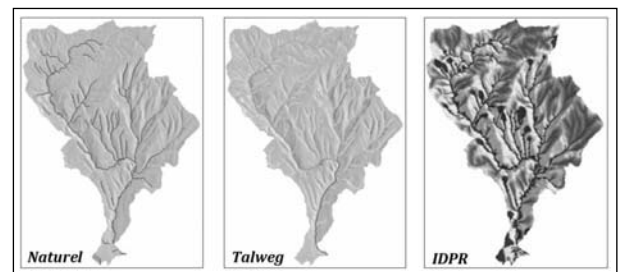


Figure 1. Cartes représentant l'évolution du contexte naturel, au talweg et à l'IDPR.

Carthage n'ont pas été jugées suffisamment significatives, et l'utilisation de la BD TOPO est donc pertinente.

Le modèle numérique de terrain (MNT)

Le tracé du réseau théorique des écoulements est fondé sur l'analyse des talwegs et s'établit à partir du modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 20 m, à l'aide des techniques de traitements spatiaux intégrés aux logiciels de Système d'Information Géographique (SIG). 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 ce projet ont été développés pour l'application ArcView®.

L'extraction automatique de réseaux (talwegs ou crêtes) exploitée 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 à 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 à 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 qu'il est nécessaire de traiter afin de rétablir l'écoulement potentiel.

La pluviométrie

Le régime des précipitations de la Martinique est caractérisé par une saison sèche ou « carême », centrée sur les mois de février (moyenne interannuelle 65 mm à Fort-de-France) à avril, et une saison humide ou « hivernage » centrée sur les mois de juillet à octobre (moyenne interannuelle 255 mm en septembre à Fort-de-France) et coïncidant avec la période cyclonique. L'intensité des précipitations peut être forte : jusqu'à plusieurs centaines de mm en moins de 24 h. Le régime des alizés, soufflant de l'Est, et le relief conditionnent fortement la répartition spatiale de la pluie. Les précipitations moyennes annuelles sont inférieures à 1 500 mm dans les zones de faible relief

du sud et de l'est de l'île (presqu'îles de Sainte-Anne et de la Caravelle). Elles croissent très fortement avec l'altitude pour atteindre 5 000 mm par an au droit des pitons du Carbet, du bassin de Champflore et, dans une moindre mesure, de la montagne Pelée, dont le relief relativement aigu constitue un moindre facteur de pluviosité. L'effet de foehn associé au relief est à l'origine de la faible pluviométrie relevée le long de la côte caraïbe, en particulier sous le vent des sommets du nord de l'île.

Ce contraste de pluviométrie et cette nette dissymétrie entre le nord très pluvieux et le sud beaucoup moins arrosé influe sur les réseaux hydrologiques naturels. Afin de comparer au mieux les réseaux réels aux réseaux théoriques, deux réseaux de talwegs ont été calculés, avec un réseau plus dense défini sur la zone à plus forte pluviométrie.

Cartographie de l'indice de vulnérabilité

Afin d'obtenir une cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de Martinique, l'IDPR doit être pondéré d'une part en fonction du type de nappe et, d'autre part, en fonction de l'épaisseur de la ZNS.

Le 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 et vers lesquelles les polluants peuvent être diffusés librement via le sol et la zone non saturée) sont en effet plus vulnérables que les nappes captives. Ainsi, dans un contexte très infiltrant et notamment lorsque l'épaisseur de la ZNS est inconnue, un indice IDPR faible n'aura pas la même influence sur la vulnérabilité de l'aquifère, selon que l'on se trouve dans une nappe captive ou dans une nappe libre.

Une pondération non linéaire du critère IDPR a donc été appliquée, pondérée de 0 à 100 en fonction de la nature de l'écoulement (libre ou captif). Trois configurations 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 à ce critère 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).

La zone non saturée

Le critère IDPR est également pondéré en fonction de l'épaisseur de la ZNS selon la formule suivante : $V_i = \text{Poids IDPR} * [\text{Critère IDPR}] + \text{Poids ZNS} * [\text{Critère ZNS}]$, avec : $\text{poids IDPR} + \text{Poids ZNS} = 1$ et V_i compris entre 0 et 100.

La valeur de la pondération varie ainsi en fonction de la **lithologie de l'aquifère**. Sept occurrences sont distinguées, selon l'importance accordée au critère ZNS. Celui-ci 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.

La protection naturelle d'un aquifère vis-à-vis des pollutions dépend également de l'**épaisseur de la ZNS**. Pour un aquifère libre, l'épaisseur de la ZNS est la distance entre la surface du sol et le niveau de la nappe. Pour un aquifère captif, elle est égale à la distance entre la surface et le toit de l'aquifère. Au sein de la ZNS la quantité d'eau gravitaire est temporaire, en transit. Elle se divise en trois parties, différenciées en fonction de la 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 ;
- une frange capillaire qui, en plus de la percolation *per descensum* (recharge) correspond à l'eau de la nappe remontant par ascension capillaire.

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

L'épaisseur de la ZNS n'est connue que dans les seuls secteurs de Martinique où des forages ont été réalisés. Cette information a été calculée sur les 174 forages référencés en BSS et pour lesquels les éléments nécessaires au calcul sont disponibles. Pour cela, l'altitude moyenne du toit de la nappe en mètres NGM a été soustraite 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.

Afin d'extrapoler les données ponctuelles disponibles, une hiérarchisation et une spatialisation de l'épaisseur a été réalisée. Tout d'abord deux grands ensembles ont été définis, selon que l'information sur la ZNS est disponible ou non. En effet, 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 sont identifiés comme tels. D'autre part, 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.

Agrégation en unités fonctionnelles

Afin de faciliter la lecture, l'interprétation et la représentativité des résultats maillés de l'IDPR, ceux-ci ont été affectés à des unités fonctionnelles. Pour ce faire, il était nécessaire de définir des 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 et les unités aquifères d'ordre 1 définies par Vittecoq *et al.*, (2007), correspondant à la délimitation des premiers aquifères rencontrés, selon une méthodologie similaire à celle développée en métropole dans le cadre du référentiel hydrologique national (BDRHF et BDLISA). Des unités fonctionnelles cohérentes ont ainsi été obtenues. Le résultat de l'IDPR a ensuite été affecté à chaque unité fonctionnelle ainsi créée, grâce aux techniques de statistiques zonales (médiane du critère IDPR).

Résultats et discussion

Deux cartes principales ont été réalisées, l'une de l'IDPR et l'autre de la vulnérabilité intrinsèque, résultant de la pondération de l'IDPR en fonction du type de nappe et de l'épaisseur de la ZNS.

L'IDPR résulte du rapport entre la distance au plus proche cours d'eau réel et la distance au plus proche talweg calculé, ces deux distances étant pondérées par la pente. L'IDPR varie selon une échelle comprise entre 0 et n et est arbitrairement ramené à une gamme de 0 à 2 000 ; il est inférieur à 1 000 quand le réseau théorique n'est pas repris par une rivière réelle. Ce rapport indique alors une infiltration majoritaire des eaux 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. Une valeur IDPR de 1 000 indique que l'infiltration et le ruissellement superficiel sont de même importance. Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les écoulements en place. Une valeur IDPR supérieure à 1 000 rend compte d'un 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 ne soit directement justifiée par un talweg. Une valeur IDPR proche ou égale à 2 000 témoigne d'une 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'infiltrera pas. Si la nappe est profonde, le caractère ruisselant peut démontrer une imperméabilité des terrains naturels.

La figure 2 présente le résultat du calcul de l'IDPR sur la Martinique, avec un maillage composé de cellules de 20 m de côté. Les zones blanches et noires indiquent respectivement les zones infiltrantes et ruisselantes. 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). La carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique est quant à elle présentée dans la figure 3. Les unités fonctionnelles les plus vulnérables sont représentées en noir ou gris foncé et les moins vulnérables en gris clair ou en blanc. Afin de faciliter la lecture, des cartes par masses d'eau ont également été réalisées³.

Globalement, on constate qu'environ la moitié des unités fonctionnelles présentent 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 autour de la montagne Pelée ; il s'agit des aquifères situés dans les nuées ardentes et ponces (Fig. 4). La carte du haut représente la carte géologique à 1/50 000 (Westercamp *et al.*, 1990), les nuées ardentes sont notées Nxx, 1902, 1929 et les ponces Px. La carte du bas représente un zoom de la carte de vulnérabilité.

Dans ce type de formation, les nappes sont libres, l'épaisseur de ZNS globalement élevée et les perméabilités les plus fortes observées en Martinique. 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 ZNS, 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) est une zone où le ruissellement est majoritaire : l'infil-

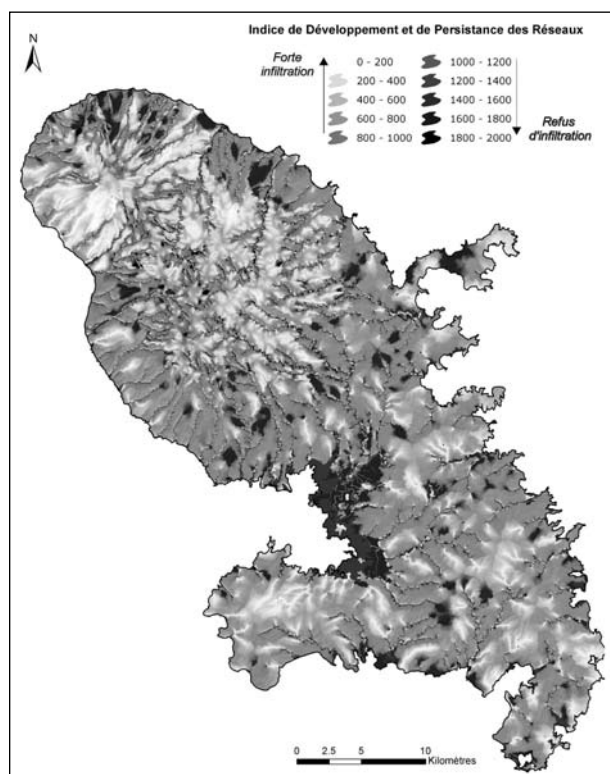


Figure 2. Résultat du calcul de l'IDPR sur la Martinique.

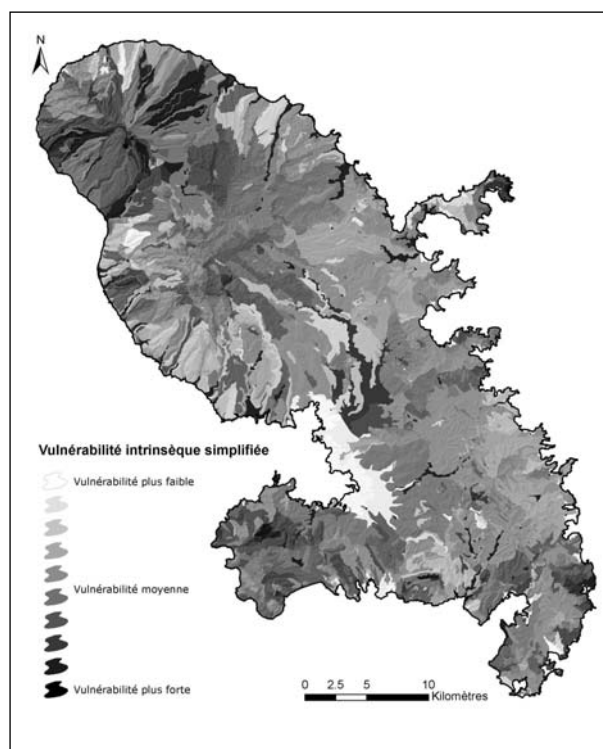


Figure 3. Carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique.

3. Toutes ces cartes sont disponibles en couleurs dans le rapport BRGM/RP-56283-FR (Allier *et al.*, 2008) téléchargeable sur le site www.brgm.fr.

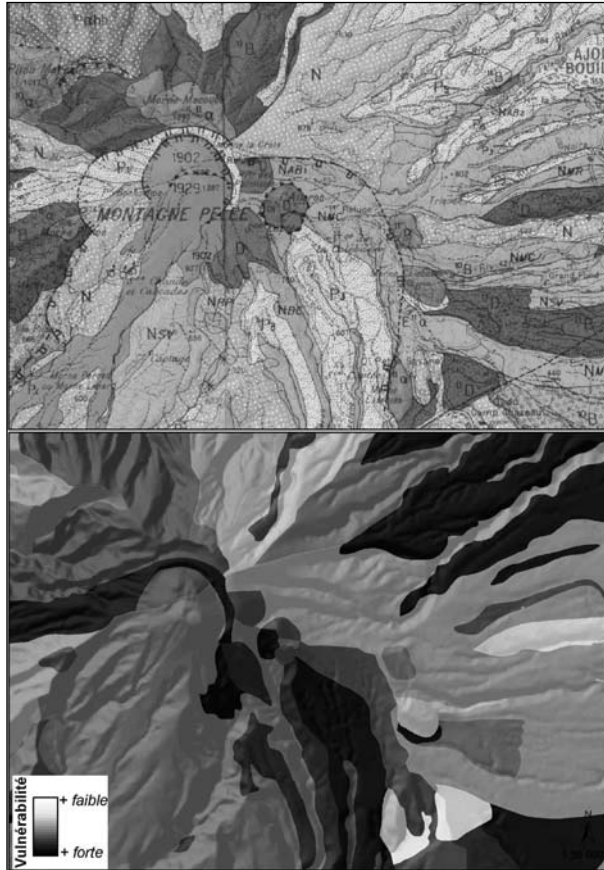


Figure 4. Cas des aquifères situés dans les nuées ardentes et ponces.

tration 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 est également nécessaire de rappeler qu'il s'agit d'une carte de vulnérabilité relative, dont l'intérêt 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 de faible vulnérabilité ne correspond pas une entité non vulnérable, en référence à une échelle absolue, mais à une entité de vulnérabilité plus faible que celle des autres unités.

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. La transcription cartographique de ces résultats 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 le soient dans une zone où la vulnérabilité des eaux souterraines est plus faible plutôt que dans un secteur où la vulnérabilité est plus forte.

La valorisation de cette méthode se poursuit actuellement en Martinique par la réalisation de cartes de risques en croisant la carte de vulnérabilité avec les principales pressions identifiées sur l'île à savoir : les intrants agricoles (nitrates, produits phytosanitaires et notamment le chlordécone⁴), l'urbanisation et le réseau routier (Pinson *et al.*, 2008). Des mises à jour sont bien évidemment envisageables, notamment pour la prise en compte d'autres pressions, la modification des pondérations ou la réalisation d'autres croisements, en fonction des préoccupations et des objectifs (politiques sectorielles, aide à la programmation, aide à la mise en œuvre...).

Par ailleurs, cette méthode est aussi en cours de valorisation à Mayotte dans le cadre de la délimitation des bassins d'alimentation de captages (BAC) et de la caractérisation de leur vulnérabilité. La méthodologie développée et adaptée à ce territoire à la superficie et au relief spécifique, présentée par Malard *et al.*, (2009), se base sur l'IDPR pondéré par un indice de rugosité qui permet d'incorporer la variabilité dans l'aspect et la direction de la pente. Le croisement de la carte ainsi obtenue avec les pressions existante dans les BAC permet ainsi de caractériser le risque auquel est soumis le captage.

Cette méthode de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines a ainsi vocation à devenir un véritable outil d'aide à la gestion et à la surveillance de la ressource en eau souterraine.

Références

- Allier D., Vittecoq B., Mardhel V., 2008 : Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la Martinique. Rapport BRGM/RP-56283-FR.

4. Insecticide utilisé pour le bananier, interdit d'utilisation aux Antilles depuis 1993.

MÉTHODOLOGIE POUR LA CARACTÉRISATION DE LA SENSIBILITÉ DES AQUIFÈRES

- Bézèlgues 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. Rapport BRGM/RP-51783-FR.
- Bézèlgues S., Mardhel V., Gravier A., 2006a : Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante – Guadeloupe Phase 3. Rapport BRGM/RP-53456-FR.
- Bézèlgues S., Gravier A., Mardhel V., 2006b : Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante – Guadeloupe Phase 4. Rapport BRGM/RP-54339-FR.
- Gogu, R. and Dassargues, A., 1998: Sensitivity analysis for the EPIK vulnerability assessment in a local karstic aquifer. Workshop “Vulnérabilité et protection des eaux karstiques”. Neuchâtel (Suisse).
- Gogu, R.C. and Dassargues, A., 2000: Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39(6), 549-559.
- 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. Rapport BRGM/RP-52677-FR.
- Malard A.-B., Aunay B., Vernoux J.-F., Mardhel V., 2009 : Définition d'une méthodologie commune aux études des bassins d'alimentation de captages à Mayotte. Principes de délimitation des bassins et de caractérisation de la vulnérabilité des captages – Rapport BRGM/RP-57299-FR.
- Mardhel V., Frantar P., Uhan J., Miso 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. Ustron, Poland, 15-18 June 2004., Poland 15 to 18 June 2004.
- Mardhel V., Gravier A., Koch Mathian J.-Y., Nowak C., Terreyre J.-L., Raguét 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.
- Pinson S., Vittecoq B., Allier D., Mardhel V., 2008 : Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique : synthèse cartographique. Rapport BRGM/RP-56242-FR.
- Vernoux J.-F., Wuilleumier A., Seguin J.-J., Dorfliger N., Martin A., 2007 : Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation de 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. Rapport BRGM/RP-55332-FR.
- Vittecoq B., Lachassagne P., Lanini S., Ladouche B., Marechal J.-C., Petit V., 2007 : Élaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caractérisations quantitatives. Rapport BRGM/RP-55099-FR.
- Westercamp D., Pelletier B., Thibaut P.-M., Traineau H. (1990) Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Martinique-Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières. Notice explicative par Westercamp D., Andreieff P., Bouysse P., Cottez S., Battistini R. (1989), 246 p.