

Définition d'une méthodologie de dimensionnement des zones de protection des ouvrages de captages d'eaux souterraines en zone de socle. Cas de la zone test du bassin versant d'Ehania (Sud-est de la Côte d'Ivoire).

Definition of a methodology for groundwater protection zones delineation in hard rocks. Case study of the Ehania watershed (South-Est Ivory Coast)

Dibi Brou¹, Plagnes Valérie², Konan-Waidhet Arthur Brice¹, Savané Issiaka³

1. Université Jean Lorougnon Guedé, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire)
2. Universsité Pierre Marie Curie, UMR MÉTIS (ex sisyphé) - case courrier 105, 4 place Jussieu - 75252 Paris Cedex 05 - France
3. Université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02 (Côte d'Ivoire)

RESUME

La protection des aquifères constitue une préoccupation majeure pour les autorités surtout dans les zones où il existe d'importantes exploitations agroindustrielles. L'objectif de cette étude est de définir une nouvelle méthode de protection des aquifères à partir des caractéristiques des ouvrages et des aquifères. La méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, PaPRI a été utilisée. Elle constitue une variante de la méthode PaPRIka appliquée en milieu karstique. Cette méthode a fait l'objet d'une adaptation aux milieux de socles fissurés en tenant compte des caractéristiques de ce milieu. PaPRI signifie la protection des aquifères (Pa) évaluée à partir de trois critères: P pour la protection (paramètre le plus protecteur entre la couverture pédologique, la zone non saturée et l'épaisseur de la couche d'altérite), R pour le type de roche, I représente l'infiltration. PAPRI est une méthode basée sur la pondération des différents critères. Cette méthode a été appliquée au bassin versant d'Ehania (342 km²), localisé dans l'extrême sud-est de la Côte d'Ivoire. Les résultats obtenus font ressortir 4 classes qui évoluent des classes dites de faible vulnérabilité (5 % de la zone d'étude) aux classes de forte et très forte vulnérabilité (58 %) en passant par celles dite de moyenne vulnérabilité (37 %). Les classes de forte et très forte vulnérabilité qui indiquent les zones très exposées à la pollution sont plus présentes dans la partie centre – nord ainsi que quelques apparitions vers le sud. Ces zones pourraient être liées à la topographie du fait des pentes souvent très élevées observées dans la zone. L'un des avantages de cette nouvelle méthode réside dans la caractérisation des altérites qui influencent fortement la migration des polluants vers les nappes en fonction de leur nature et de leur épaisseur.

INTRODUCTION

Les ressources en eaux souterraines jouent un rôle important dans la satisfaction des exigences en approvisionnement en eau. A cause des activités anthropiques et des changements climatiques régionaux

qui réduisent ou rendent inaptés à la consommation les ressources en eau (Thirumalaivasan et al. 2003), ces ressources sont cependant très vulnérables. la surveillance et les actions de lutte contre d'éventuelles contaminations font partie des préoccupations les plus importantes des gestionnaires de l'eau à travers le monde (Aksever et al., 2015). Plusieurs approches évolutives allant des méthodes traditionnelles (DRASTIC, GOD, SINTACS) basées uniquement sur la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à celles incluant les propriétés du milieu (DISCO, DRASTIC-fm, DRATIC – P, DRASTICLU) ont été adoptées (Dibi et al., 2012). Cependant, toutes ces méthodes bien qu'efficaces ne permettent que l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de façon ponctuelle, c'est-à-dire correspondant uniquement à la zone concernée par l'étude. L'élaboration d'une méthodologie pour la cartographie de périmètres de protection apparait essentielle. Cela est nécessaire surtout dans les grandes zones de production agricole où les apports de contaminants peuvent être importants comme c'est le cas de notre zone d'étude qui renferme d'importantes exploitations agro-industrielles (Doumouya et al., 2012). Si une telle méthode a déjà été élaborée en milieu karstique à travers plusieurs versions dont la dernière est PaPRIKa (Kavouri et al., 2011 ; Huneau et al., 2013), ce n'est pas encore le cas en zone de socle. Vu les objectifs communs avec la problématique rencontrée en zone de socle, la présente étude a donc été initiée pour tenter adapter la méthode PaPRIKa au milieu de socle sur la base des caractéristiques intrinsèques des aquifères en milieu cristallin et cristallophyllien. L'objectif de cette étude est donc d'élaborer une méthodologie permettant non seulement de cartographier les zones de protection des captages d'eaux souterraines en milieu de socle mais aussi dans les zones de recharge des aquifères.

I. Matériel et méthodes

I.1. Site de l'étude

Le bassin versant d'Ehania (Figure 1) site de cette étude est localisé dans l'extrême sud-est de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 2°45 W et 3°05 W ainsi que les latitudes 5°10 N et 5° 45N. Il couvre environ 342 km².

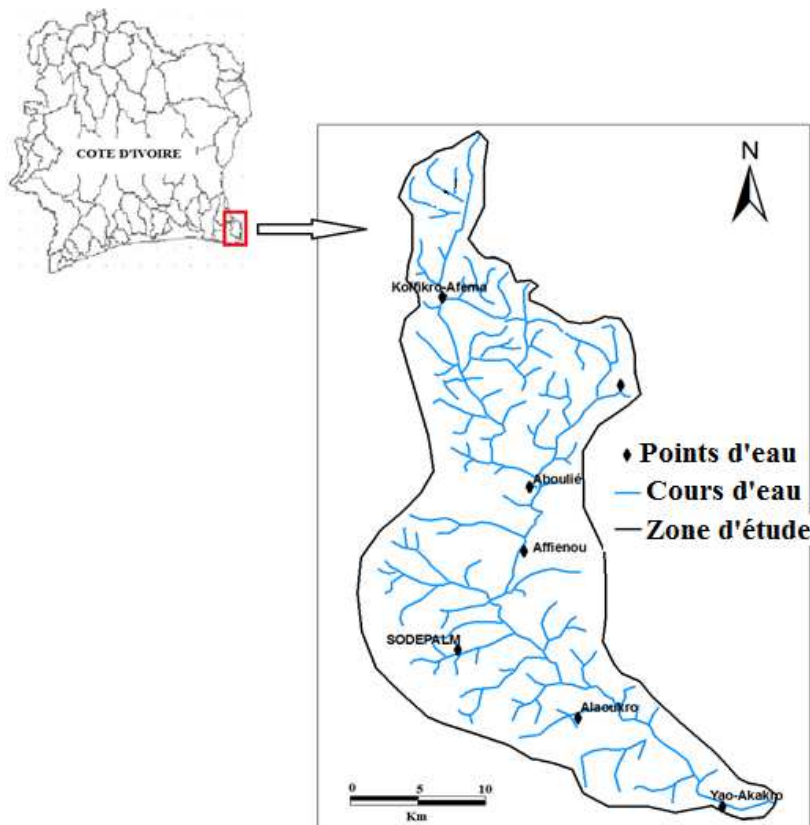


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Les formations géologiques sont à dominance schisteuses vers le Nord avec l'apparition d'une faible couche de formations sédimentaires au Sud en passant par quelques lambeaux de granites. Concernant la topographie, le site est constitué de hauts plateaux avec des altitudes variant généralement de 100 à 400 m. Le réseau hydrographique, qui est considéré comme un indicateur de recharge des aquifères, est très dense dans le Nord et moins dense dans le Sud.

I.2. Choix de la méthode

La méthode PaPRI est une adaptation de la méthode PaPRIKa ; elle est basée sur les paramètres de protection (P), les caractéristiques de la roche réservoir (R) et sur l'évaluation de l'infiltration (I). L'absence de karstification conduit à la limitation du nombre de paramètres à trois contre quatre pour PaPRIKa. Cette adaptation est liée au fait qu'au niveau des aquifères du socle, nous rencontrons des entités hydrogéologiques ayant les mêmes rôles en terme de fonctionnement hydrodynamique.

I.3. Définition des différents critères

Le critère P représente tous les facteurs qui contribuent à la protection de la nappe face à l'infiltration. Il caractérise l'aptitude à réduire le transport des polluants et leur vitesse de transfert depuis la surface vers la nappe. Il dépend principalement de la nature et de l'épaisseur du sol (S), mais aussi des altérites (A) et de la zone non saturée (ZNS) ainsi que de la fracturation de celle-ci.

Le critère R désigne la nature géologique du réservoir aquifère caractérisée par la lithologie et la fracturation (Dörfliger et Plagnes, 2010). Il est spatialisé à partir des cartes géologiques, des observations de terrain, des données sur la nature lithologique et des coupes de forages.

Le critère (I) concerne les conditions d'infiltration. Cette infiltration est fonction de plusieurs paramètres qui pourraient soit l'accélérer, soit la retarder en fonction de leur nature. Cette infiltration est conditionnée par 2 critères importants que sont la pente et la densité de drainage. L'importance de ces deux paramètres a déjà été signalée dans plusieurs travaux (Sinan et Razack, 2009).

I.4 : Calcul des coefficients de pondération

Le calcul des poids ou coefficients de pondération est réalisé à partir de la méthode de Saaty (1977) basée sur la comparaison par paires. Le Tableau 1 donne la relation entre l'expression verbale de l'importance entre critères et la valeur quantitative qui en résulte.

Tableau 1 : Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de facteurs (El Morjani, 2003)

| Expression verbale de l'importance relative d'un critère par | |
|--|-------|
| rapport à un autre | Notes |
| Moins important | 1/3 |
| Légèrement moins important | 1/2 |
| Même importance | 1 |
| Légèrement plus important | 2 |
| Plus important | 3 |

Les valeurs issues de cette comparaison ont par la suite été intégrées dans un calcul de vecteur propre (Eq. 1) et de coefficient de pondération (Eq. 2) pour chaque paramètre (Doumouya et al., 2012).

$$V_{p_i} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Ni} \quad (\text{Eq. 1})$$

et

$$W_i = \frac{V_{p_i}}{\sum_{i=1}^n V_{p_i}} \quad (\text{Eq. 2})$$

avec V_{p_i} = Vecteur propre de chaque facteur ; N_i = valeur de chaque facteur et (W_i) = coefficient de pondération de chaque facteur.

Sur cette base, des matrices de corrélation ont été élaborées pour chaque sous-critère pour déterminer au niveau de chaque maille la valeur du critère concerné (Tableaux 2, 3 et 4).

Tableau 2 : Tableau des coefficients de pondération des critères de P

| | ZNS | Altérites | Sol | Vecteur Propre | Coefficient de Pondération |
|-----------|-----|-----------|-----|----------------|----------------------------|
| ZNS | 1 | 2 | 3 | 1,82 | 0,40 |
| Altérites | 1/2 | 1 | 2 | 1,51 | 0,35 |
| Sol | 1/3 | 1/2 | 1 | 1,22 | 0,25 |

Tableau 3: Tableau des coefficients de pondération des critères de R

| | Fracturation | Nature roche | Vecteur Propre | Coefficient de pondération |
|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------------------|
| Fracturation | 1 | 2 | 1,73 | 0,60 |
| Nature Roche | 1/2 | 1 | 1,24 | 0,40 |

Tableau 4: Tableau des coefficients de pondération du critère de I

| Critères | Vecteurs Propres | Coefficients Pondérations |
|---------------------|------------------|---------------------------|
| Pente | 1,73 | 0,60 |
| Densité de drainage | 1,24 | 0,40 |

1.5. Détermination de l'indice de vulnérabilité

Le calcul de l'indice de vulnérabilité globale est basé sur la base de la méthode DISCO (OFEFP/OFEG, 2003), selon l'équation suivante (Eq. 3). Le Tableau 5 présente les coefficients de pondération résultants de cette approche.

$$V_g = iI + pP + rR \quad (\text{Eq. 3})$$

avec I, P et R représentant les différents critères et i, r et p les poids de ces critères.

Tableau 5 : Tableau des coefficients de pondération des critères

| Critères | Vecteurs Propres | Coefficients Pondérations |
|------------------------|------------------|---------------------------|
| (i) Infiltration | 2 | 0,45 |
| (p) Protection | 1,67 | 0,35 |
| (r) Nature de la roche | 0,61 | 0,20 |

L'équation devient : $V_g = 0,45I + 0,35P + 0,20R$

II. RESULTATS

II.1. L'analyse des résultats des différents critères

La carte critère P (coefficient de pondération = 0,35) (Figure 2a) qui représente la protection reste dominée par la classe forte et très forte qui couvre 80 % de la zone d'étude. Cette classe jugée de forte protection se rencontre sur la quasi-totalité de la zone d'étude où les formations géologiques sont généralement schisteuses. Ces classes sont dues à une importante épaisseur d'altération qui est supposée être plus riche en argile. Quant aux classes de faibles à moyenne protection (20 %), elles s'observent dans les bas-fonds, surtout pour la classe de faible protection. Pour la classe moyenne, sa présence est remarquée dans les zones de contact entre le socle et les formations sédimentaires ainsi que sur les formations généralement granitiques. Le critère R joue un rôle qui représente le critère le moins important dans l'évaluation (Coefficient de pondération = 0,2) en terme de protection de l'aquifère. Pour ce critère R, plus la vulnérabilité est forte moins l'aquifère est protégé. L'analyse des résultats de ce Critère (Figure 2b) montre que le bassin est dominé par la classe présentant la plus forte vulnérabilité (44 %) qui se rencontre dans la partie centrale ainsi que dans le centre - nord. Dans ces zones, la roche aquifère est constituée de schistes. Pour ce qui est des classes de moyenne et faible vulnérabilité qui couvrent à elles seules plus de 50 % de la zone d'étude, elles se rencontrent dans l'extrême nord, sud et centre-est de la zone d'étude. L'analyse du critère I (Figure 2c) fait ressortir les 4 classes de vulnérabilités définies. Ce critère, qui traduit la capacité du bassin à résister ou à favoriser l'infiltration, reste dominé par les classes de faibles et moyennes vulnérabilité liée à l'infiltration qui se rencontrent sur la quasi-totalité de la zone d'étude dans les zones où le réseau hydrographique est relativement dense. Dans ces zones, les pentes sont importantes. Les classes de faible infiltration couvrent 39% de la surface et se rencontrent globalement sur toute la zone d'étude. Quant aux classes de forte et très forte vulnérabilité, elles sont plus présentes dans les zones sud et centre avec quelques faibles apparitions dans le nord là où les pentes faibles sont accompagnées d'une faible densité de drainage.

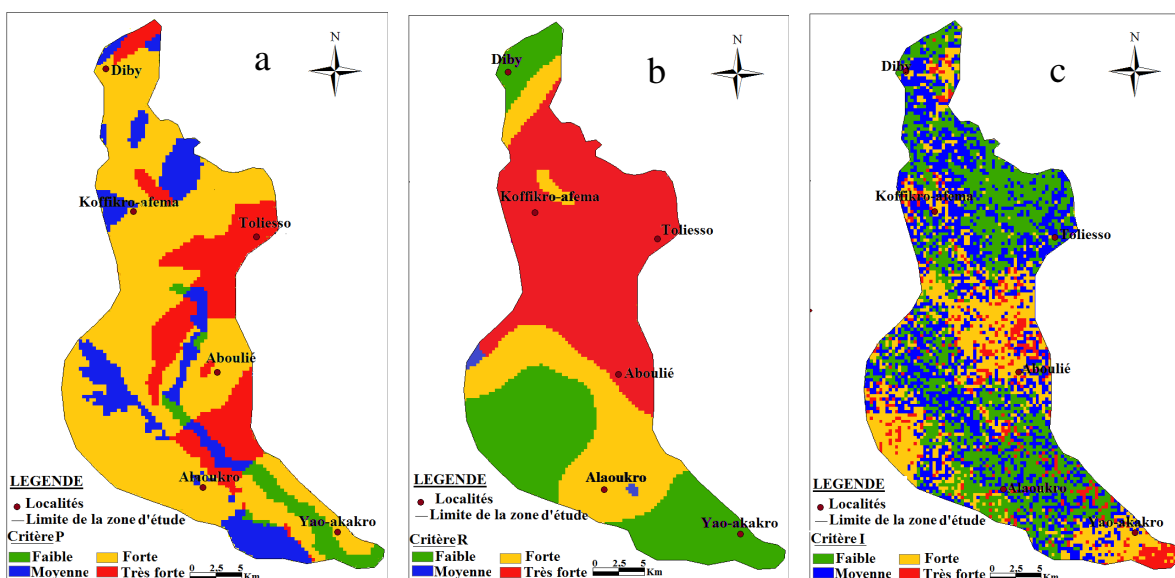


Figure 2 : Cartes des différents critères ((a). Critère P ; (b). Critère R ; (c). Critère I)

II.2. Carte de vulnérabilité

La combinaison de l'ensemble des critères a permis d'obtenir la carte de vulnérabilité par la méthode PaPRI. La carte finale (Figure 3) a la particularité de faire ressortir les zones à protéger. A l'analyse cette carte montre une vulnérabilité couvrant les 4 classes définies. Les zones de faible et moyenne vulnérabilité occupent environ 42 % de la superficie totale de la zone d'étude et s'observent généralement sur les

formations schisteuses ou granitiques accompagnées de pente généralement moyennes. Elles sont cependant plus présentes dans le secteur centre-nord avec quelques poches isolées dans la partie centrale. La classe de forte vulnérabilité est de loin la classe la plus importante de la zone étude. Elle couvre 47 % de la zone d'étude. Elle est signalée dans tous les secteurs où cohabitent les pentes moyennes accompagnées de formations sédimentaires ainsi que les schistes. Si elle se rencontre sur la quasi-totalité de la zone d'étude, sa présence est plus renforcée dans le centre et le sud. Pour ce qui concerne la classe de vulnérabilité très forte qui couvre 11 % de la zone d'étude, elle se rencontre globalement dans le sud et le centre-ouest de la zone d'étude avec une apparition dans le nord au niveau de Diby. Dans ces zones, les formations sont généralement schisteuses dans les secteurs où les pentes sont faibles. Ces zones sont considérées comme des secteurs à surveiller. Dans ces zones, l'implantation de toute exploitation pouvant causer des dommages à la nappe doit faire l'objet d'une étude préalable pour apprécier les dispositions à prendre en fonction de l'importance et de l'objectif de l'exploitation

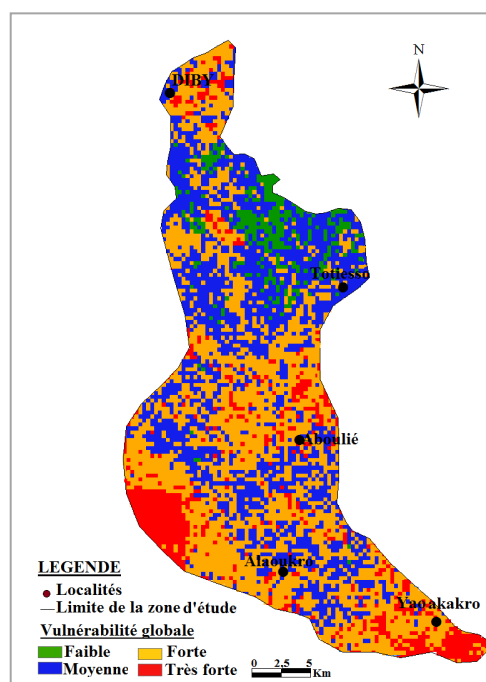


Figure 3 : Carte de vulnérabilité globale

III. DISCUSSION DES RESULTATS

La méthode PaPRI se présente comme une nouvelle méthode pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des milieux fissurés. Tout comme la méthode PaPRIKa, la méthode PaPRI, spécialement conçue pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque, est fondée sur des facteurs structurels et sur les comportements hydrauliques en accord avec les concepts de Mangin (1975) développés pour les karsts. Le facteur P qui caractérise la protection de la nappe regroupe tous les facteurs capables de jouer le rôle de premier rideau pouvant empêcher les polluants d'atteindre la nappe. Selon la porosité des roches qui constituent ces milieux, les polluants peuvent être retardés ou accélérés. La capacité de protection du bassin versant d'Ehania réside dans l'existence non seulement de formations métamorphiques, mais aussi dans l'importance des couches d'altérites. La nature de la zone non saturée, en plus de la couche d'altérites, renferme encore une partie des roches fissurées et renforce la protection des ressources sous-jacentes. La combinaison de l'ensemble de ces critères ajoutée à une couche de sol

dont l'épaisseur reste variable pourrait expliquer la forte capacité de protection des aquifères. L'importance du critère R dépend de la capacité de ce dernier à se laisser traverser par l'eau. Ainsi, plus la roche est dure ou résistante, moins elle se laisse traverser par l'eau. Au niveau des formations du socle, le critère R est fortement dépendant de la fracturation et de l'altération qui affecte les propriétés hydrodynamiques du réservoir. Quant à la carte du critère I, elle est fortement dépendante de la pente et la densité de drainage. Cependant, la pente reste le paramètre le plus important. En effet, selon les travaux de Doumouya et al. (2012), dans les zones de faibles pentes et de fortes valeurs de perméabilité, la disponibilité des eaux souterraines varie de bonne à excellente. Cela signifie que dans les zones de faibles pentes, l'eau reste en contact avec le sol plus longtemps et facilite son infiltration par rapport aux zones de fortes pentes. L'eau est alors rapidement évacuée comme l'ont indiqué les travaux de Prasad et al. (2008) qui ont montré que plus les pentes sont fortes et la densité de drainage est importante, plus la probabilité d'infiltration des eaux vers la nappe est faible et vice-versa.

CONCLUSION

Au terme de cette étude de l'évaluation de la vulnérabilité à partir de la nouvelle méthode PaPRI, des résultats importants ont été obtenus. Cette méthode est particulièrement efficace du fait du nombre important de paramètres utilisés. En effet, plus ce nombre est important plus la méthode est robuste et plus le recours à des croisements cartographiques entre paramètres est justifié. La capacité d'une couche à réduire l'infiltration verticale dépend à la fois de la nature et de l'épaisseur de la couche. En effet, l'épaisseur d'altération joue un rôle primordial dans le ralentissement de l'infiltration. Le facteur protection des aquifères (pondération = 0.35) reste largement dominé par les classes de forte et de très forte protection qui couvrent environ 80 % de la zone d'étude. Elles se rencontrent sur la quasi-totalité de la zone d'étude là où l'on rencontre généralement les schistes et les formations sédimentaires. Quant au facteur type de roche (R) qui semble être le facteur le moins important (pondération = 0.20), il est dominé par la classe de faible vulnérabilité qui couvre près de 44 % de la zone d'étude. Elle se rencontre dans la partie centrale et centre nord là où les formations sont généralement schisteuses. Le facteur I qui est le paramètre le plus important (pondération = 0.45) est dominé par les classes moyenne et forte vulnérabilité qui représentent respectivement 37% et 47 %. Ces classes couvrent les régions où les pentes évoluent de moyennes à forte. Les résultats obtenus au cours de cette étude ont permis d'identifier les différentes zones de vulnérabilité globale et de répertorier les zones à protéger. Ainsi, 58% de la zone ont été identifiées comme des zones dites vulnérables regroupant les classes de forte et très forte qui nécessite une protection. Ces zones s'observent sur la quasi-totalité de la zone d'étude avec une concentration dans les secteurs centres et sud. Une validation de cette méthode permettrait de confirmer les importants résultats obtenus sur le terrain.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aksever F., Karagüzel R., Mutlutürk M. (2015). Evaluation of groundwater quality and contamination in drinking water basins: a case study of the Senirkent-Uluborlu basin (Isparta-Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 73 (3) : 1281-1293.

Dibi B., Kouame K. I., Konan-Waidhet A. B., Savane I., Biemi J., Nedeff V. and Lazar G. (2012). Impact of agriculture on the quality of groundwater resources in peri-urban zone of Songon (Côte d'Ivoire). *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(12): 2173-2182.

Dörfliger N et Plagnes V (2010). Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques guide méthodologique de la méthode PaPRIKa [Mapping the vulnerability of karst aquifers. Guidelines of the method PAPRIKa]. Rapport BRGM RP-57527-FR, BRGM, Orleans, France, 100 pp.

Doumouya I., Dibi B., Kouame K. I., Saley B., Jourda J. P., Savane I. and Biemi J. (2012). Modelling of favourable zones for the establishment of water points by geographical information system (GIS) and multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Côte d'Ivoire). *Environmental Earth Science*, 67:1763–1780, DOI 10.1007/s12665-012-1622-2.

El Morjani Z. (2003). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de doctorat, université de Genève. *Terre et Environnement* Vol. 42, 300 p.

Huneau F., Jaunat J., Kavouri K., Plagnes V., Rey F., Dörfliger N. (2013). Intrinsic vulnerability mapping for small mountainous karst aquifers, implementation of the new PaPRIKa method to Western Pyrenees (France). *Engineering Geology* 161 (2013) 81–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.028>.

Kavouri K., Plagnes V., Tremoulet J., Dörfliger N., Reijiba F., Marchet P. (2011). PaPRIKA: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal* 19, 339–353.

Mangin A (1975) Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques [Contributions to the hydrodynamics of karst aquifers]. Thèse, Université Dijon, France, 124 pp.

OFEFP/OFEG, (2003). Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré. Guide Pratique. 83p.

Saaty TL (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J Math Psychol* 15:234–281.

Sinan M and Razack M (2008). An extension to the DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco). *Environ Geol*. doi: 10.1007/s00254-008-1304-2.

Thirumalaivasan D., Karmegam M., Venugopal K., (2003). AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS, *Environmental Modelling & Software*, 18, 645656.