

Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères alluviaux de montagne par utilisation conjointe d'un modèle d'écoulement souterrain et d'un modèle de suivi de particules. Application au Massif Central (France)

Djamel Mimoun, Didier Graillot

▶ **To cite this version:**

Djamel Mimoun, Didier Graillot. Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères alluviaux de montagne par utilisation conjointe d'un modèle d'écoulement souterrain et d'un modèle de suivi de particules. Application au Massif Central (France). Colloque Eau, Déchets et Développement Durable, Mar 2010, Alexandrie, Égypte. pp.191-197. emse-00476928

HAL Id: emse-00476928

https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-00476928

Submitted on 22 Oct 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères alluviaux de montagne par utilisation conjointe d'un modèle d'écoulement souterrain et d'un modèle de suivi de particules. Application au Massif Central (France)

MIMOUN D., GRAILLOT D.
Centre SITE, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
158, cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2

Résumé

L'objectif de cette communication est de proposer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères qui prenne en compte à la fois l'origine des eaux et la dynamique des écoulements souterrains. Cette méthode repose sur l'utilisation d'un modèle hydrodynamique de nappe couplé à un modèle de suivi de particules arrière.

1. Introduction

Les aquifères de moyenne montagne localisés en amont des grands bassins hydrographiques représentent une importante ressource en eau exploitée par les communes pour leur alimentation en eau potable et pour un usage agricole et industriel. En effet, de par leur situation hydro physique, le fort potentiel hydraulique des cours d'eau a suscité, dans le passé, le développement d'une activité artisanale couplée à une forte activité industrielle. Ce développement économique, suivi de l'essor de plusieurs villes dans les plaines alluviales, a entraîné une forte augmentation des prélèvements d'eau mais aussi une dégradation de la qualité des eaux. Durant les périodes de sécheresse prolongée, les demandes en eau ont de plus en plus de mal à être satisfaites. Ces situations de crise imposent de définir des règles de gestion durable de la ressource en eau alors même que ces ressources sont relativement peu connues et que leur qualité est souvent menacée par des polluants de nature différente (biologique, chimique ou physique).

L'Europe au travers de la Directive Cadre sur l'Eau demande aux Etats membres de réaliser d'une part, pour chaque bassin hydrographique, un état des lieux afin de rendre compte des divers usages de l'eau et d'évaluer leurs impacts sur la qualité chimique et biologique des eaux (bon état écologique des masses d'eau d'ici 2015). Les cartes de vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution des aquifères sont très souvent mises en œuvre. La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique, en relation avec la nappe libre, procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions selon les caractéristiques du milieu.

2. Revue des méthodes de vulnérabilité intrinsèque existantes

Il existe dans la littérature plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution des aquifères [HAM 07]. Toutes ces méthodes sont basées sur des systèmes paramétriques : le principe commun de ces systèmes consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. Chaque paramètre est subdivisé en intervalles de valeurs significatives et est affecté d'une note croissante, en fonction de son importance dans la vulnérabilité. L'indice de vulnérabilité est alors obtenu par agrégation des paramètres en utilisant des méthodes de type Analytic Hierarchy Process [SAA 84]. Ces méthodes multicritères sont très souvent intégrées dans les systèmes d'information géographique [ROY 85].

2.1 Méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC développée par l'Agence américaine de protection de l'environnement USEPA. Sept paramètres sont pris en compte dans le calcul de la valeur de l'indice de vulnérabilité : la

profondeur de l'aquifère (D : Depth to water), la recharge efficace de l'aquifère (R : net Recharge), la lithologie de l'aquifère (A : Aquifer media), le type de sol (T : Topography), la pente topographique du terrain (T : Topography), l'impact de la zone non saturée (I : Impact of vadose zone) et enfin la conductivité hydraulique de l'aquifère (C : Conductivity of the aquifer). Chaque paramètre est classé en classes associées à des cotes variant de 1 à 10. La valeur 1 représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la pollution. Une valeur numérique, appelée poids paramétrique, comprise entre 1 et 5, est ensuite attribuée à chaque paramètre, reflétant son degré d'influence. Les valeurs de l'indice de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère sont alors calculées en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants. Dans le cadre de cette méthode, les valeurs varient de 23 à 226. Ces valeurs sont ensuite classées en quatre classes permettant de définir 4 degré de vulnérabilité : faible, moyen, élevé et très élevé.

En changeant les valeurs des poids des paramètres, les auteurs de la méthode proposent deux versions : une version standard appliquée dans le cas où les contaminants sont des polluants inorganiques et une version « pesticides ».

2.2 Méthode SINTACS

La méthode SINTACS représente une adaptation de la méthode DRASTIC aux conditions méditerranéennes. Elle prend en considération les mêmes paramètres et propose cinq scénarios différents de vulnérabilité :

- un scénario « impact normal » pour les régions faiblement cultivées et peu urbanisées
- un scénario « impact sévère » pour les régions où l'occupation des sols est intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, la présence de zones industrielles et urbaines denses.
- trois scénarios qui sont fonction de l'intensité de l'infiltration des eaux superficiels vers les aquifères.

2.3 Indice de susceptibilité SI (Susceptibility Index)

Cette méthode de vulnérabilité verticale, développée au Portugal, permet de tenir compte du comportement des polluants d'origine agricole, notamment les nitrates. Prenant en considération les mêmes paramètres que les deux autres méthodes précédentes, elle introduit un nouveau paramètre qui concerne « l'occupation des sols »

1. Limite des méthodes de vulnérabilité intrinsèque existantes

Les trois méthodes présentées ont été utilisées et validées sur de nombreux cas d'application. Elles sont à présent largement utilisées même si les cartes de vulnérabilité produites nécessitent d'être confrontées à des campagnes de mesures de polluants.

Il existe cependant plusieurs limites à l'utilisation de ces méthodes de détermination de la vulnérabilité de la ressource en eau qui reposent sur la juxtaposition de cartes thématiques. Premièrement ces méthodes ne prennent pas en compte les propriétés des polluants. Les indices de vulnérabilité fournis par ces méthodes n'ont pas de réalité physique. Les résultats sont fortement dépendants du poids assigné aux différents paramètres. Enfin aucune de ces méthodes n'est fondée sur les lois physiques régissant les écoulements souterrains même si elles peuvent utiliser des résultats de modèles hydrodynamiques [LAU 98].

Il s'agit donc de compléter ces approches classiques par une approche qui tienne compte à la fois de l'origine de l'eau et de la dynamique des écoulements souterrains.

3. Zone d'étude

Le cas d'étude présenté concerne la Dore, principal affluent rive droite de la rivière Allier, elle-même affluent du fleuve Loire, qui se situe dans le grand bassin hydrographique Loire Bretagne (France). Sa situation géographique la plaçant parmi les têtes de bassin versant, lui donne une importance stratégique pour la préservation des ressources en eau du bassin de la Loire. Le bassin versant de la Dore d'une superficie de 1716 km² est localisé dans la moyenne montagne granitique du Massif Central oriental. De forme très allongée, il s'étire sur 88 km du sud au nord alors que sa largeur varie de 18 à 30 km. Deux grands ensembles peuvent être distingués : un secteur montagneux dont les

plus hauts sommets culminent à plus de 1500 m occupé par les zones humides et les tourbières et la basse plaine alluviale façonnée par la rivière qui constitue le prolongement oriental de la Grande Limagne Clermontoise. Cette grande variété de milieux est le siège d'une richesse écologique remarquable représentée par une longue liste d'habitats et d'espèces rares ou menacées de disparition : moule perlière, écrevisse à pattes blanches, loutre… De part sa situation hydrophysique, le fort potentiel hydraulique de la Dore a suscité le développement d'une activité artisanale et industrielle couplée jusque dans les années cinquante à une forte activité agricole. Ce développement économique, suivi du développement de plusieurs villes, a entraîné la dégradation de la qualité des eaux et des habitats du bassin versant de la Dore [CON 08] [MIM 08].

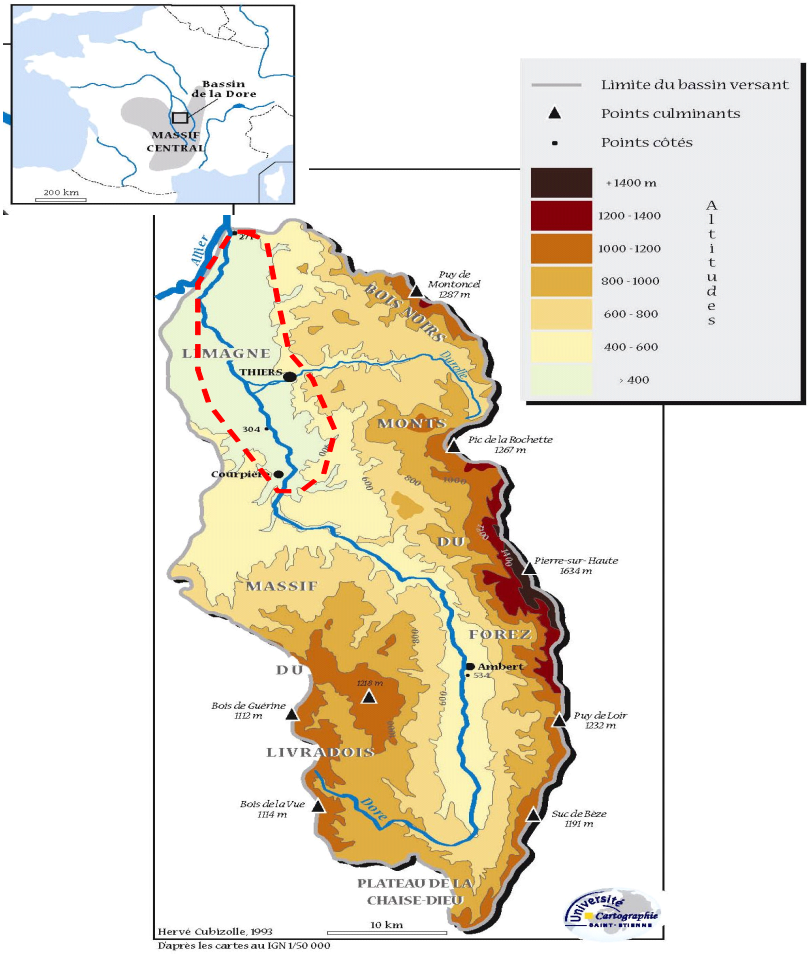


Figure 1 : Localisation du secteur d'étude. Les traits pointillés délimitent la plaine alluviale de la basse vallée de la Dore.

4. Principe de la méthode proposée

Cette partie présente les différents aspects de la méthode. La méthode choisie articule d'une part des données environnementales disponible sous forme cartographique et d'autre part des résultats issus d'un modèle mathématique d'écoulement souterrain associé à un modèle de suivi de particules arrière (approche lagrangienne) (figure 1).

Dans un premier temps, trois paramètres sont retenus pour l'appréciation de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère. Ils concernent l'épaisseur de la zone non saturée, la conductivité de l'aquifère et le type d'occupation du sol. Les 2 premiers paramètres sont une mesure indirecte du temps de propagation d'une pollution accidentelle à partir de la surface du terrain naturel vers la nappe alluviale.

L'épaisseur de la zone non saturée permet de prendre en compte l'impact de la zone vadose ou zone non saturée (ZNS) du sol qui correspond à la partie du sous-sol située entre la surface du sol et le toît

de la nappe alluviale. C'est essentiellement dans cette zone où les pores du sol sont partiellement remplis et d'eau et d'air que les phénomènes d'autoépuration ont lieu. Autrement dit, plus la nappe alluviale se trouve à une profondeur important par rapport à la surface du terrain naturel, plus elle est protégée des pollutions. Ce paramètre permet de représenter de façon indirecte le temps de propagation verticale d'un polluant dans la zone non saturée vers l'aquifère. La carte des zones non saturée a été ensuite discrétisée en 7 classes de vulnérabilité. Une valeur appelée facteur de vulnérabilité de la zone vadose, variant de 0 à 100 (du moins vulnérable au plus vulnérable), est attribuée à chaque classe.

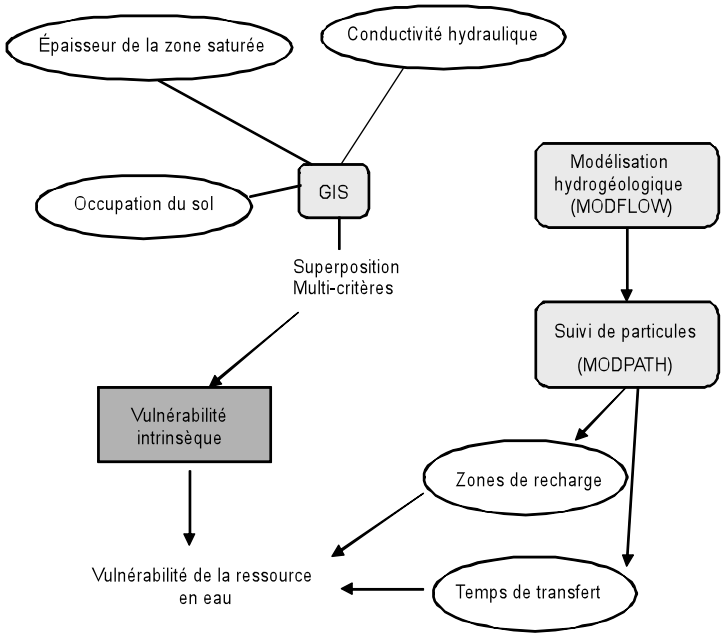


Figure 2 : Démarche séquentielle du modèle conceptuel fondé sur l'analyse hiérarchique multicritère (MHM) et sur la combinaison d'un modèle hydrogéologique et d'un modèle de tracé de particules arrière pour la construction de la carte de vulnérabilité de la ressource en eau. Les flèches indiquent la fourniture de données permettant la production des résultats.

La conductivité hydraulique décrit les caractéristiques des terrains aquifères. Il s'agit d'une mesure de la vitesse de déplacement du polluant dans la zone saturée. Ainsi, les vitesses d'écoulement souterrain (vitesse de Darcy) fortes sont caractérisées par une grande vulnérabilité. Les conductivités sont discrétisées en 7 classes de vulnérabilité auxquelles sont associées des facteurs de vulnérabilité.

Le dernier paramètre prend en compte les usages de l'eau. La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover. Les valeurs du facteur d'occupation des sols sont issues de la méthode SI (Susceptibility Index) décrite précédemment.

L'indice de vulnérabilité de la ressource en eau est calculé en faisant la somme des produits des valeurs du facteur par les poids des paramètres correspondants. Les valeurs des poids des paramètres de la méthode sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 1. Poids attribués aux paramètres

Paramètres	Poids
Epaisseur de la zone vadose	5
Conductivité hydraulique	3
Occupation du sol	5

Tableau 2. Critères d'évaluation de la vulnérabilité

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 500
Moyen	500 – 650
Elevé	650 – 800
Très élevé	> 800

Quatre classes de vulnérabilité sont alors extraites, selon les valeurs des indices de vulnérabilité : faible, moyen, élevé et très élevé (figure 3).

Dans un deuxième temps, une modélisation hydrodynamique de la zone saturée (code MODFLOW) est réalisée sur l'ensemble de la zone d'étude [CAS 86]. Pour cela, le secteur d'étude est discrétisé en mailles carrées de taille 50*50 mètres sur lesquelles sont appliquées l'équation des écoulements souterrains en milieu poreux saturé (équation de Boussinesq) qui combine l'équation de conservation de la masse et l'équation de Darcy (pertes de charge proportionnelles aux débits). Cette équation est résolue par une méthode numérique aux différences finies utilisant la méthode du gradient conjugué.

La base du modèle est construit sur des zones homogènes en terme de perméabilité avec de bas en haut un substratum imperméable, des alluvions récentes sablo-graveleuses dans l'axe de la Dore et des alluvions anciennes formant les basses et moyennes terrasses constituées de lits sablo-graveleux et argileux. L'épaisseur de l'aquifère varie de moins de 5 m pour la partie amont à 7 m pour la partie aval. Deux types de conditions aux limites du modèle sont imposées : un potentiel imposé dans les zones d'entrée liées aux apports des versants et une condition de type « drain » au voisinage de la rivière. Le calage du modèle a été fait en régime permanent sur une période de basses eaux.

Le modèle restitue en sortie une piézométrie globale ainsi que les lignes d'écoulement des eaux souterraines (figure 4). Pour chaque maille, une hauteur d'eau et une vitesse d'écoulement est calculée.

Enfin, l'application d'un modèle de suivi de particules arrière (code Modpath) permet d'identifier les zones préférentielles de recharge de la nappe alluviale. La méthode consiste à peupler chaque maille du modèle hydrodynamique d'une particule puis de faire remonter la particule le long des lignes du courant jusqu'au point origine qui correspond à la zone de recharge. Il est ainsi possible d'obtenir pour chaque maille l'origine de l'eau ainsi que le temps minimum de transfert de l'eau entre la maille de départ et la maille origine [SNY 98].

Le SIG permet alors de cartographier la distribution spatiale des points de recharge de l'aquifère et les distances de transferts (figure 5).

Au final, la vulnérabilité de la ressource en eau est appréciée en combinant la carte issue de la méthode de vulnérabilité intrinsèque avec les temps de transfert et les zones de recharge locale.

5. Résultats

La méthode présentée a été appliquée à la basse vallée de la Dore. La carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau montre un très fort degré de vulnérabilité : 80 % de la superficie de la plaine alluviale de la Dore est classée en vulnérabilité élevée à très élevée.

Les distances de transfert dans la zone saturée entre les zones de recharge et les points origine sont comprises entre 1 et 1000 m. La superposition des zones de recharge avec la carte piézométrique montre qu'elles sont localisées d'une part au droit des zones de divergence de la surface piézométrique et d'autre part dans des zones à surface piézométrique concave, c'est-à-dire dans les zones ou le gradient hydraulique décroît vers l'aval.

La comparaison des deux cartes montre une assez bonne concordance : les zones de recharge de l'aquifère sont situées dans les zones à vulnérabilité.

6. Discussion, limites de la méthode et perspectives d'amélioration

Une méthode d'estimation de la vulnérabilité des ressources en eau a été présentée. Elle consiste à compléter une méthode classique de détermination de la vulnérabilité intrinsèque des aquifère avec une approche modélisation hydrodynamique et suivi de particules. La méthode proposée permet de tenir compte des directions d'écoulement et des temps de transfert des eaux souterraines en identifiant les zones de recharges. Dans le cadre de création de périmètres de protection de la ressource en eau, ces aires d'alimentation devraient faire l'objet d'une attention particulière.

Plusieurs améliorations peuvent être apportées. Premièrement, les critères et sous-critères d'évaluation des secteurs à vulnérabilité forte font pour l'instant l'objet d'un traitement par la somme pondérée. D'autres techniques permettant de s'affranchir des effets de compensation d'un critère conduisant à une mauvaise note par un autre pour lequel la note serait très élevée pourrait être

introduites afin de prendre en compte les concordances ou discordances entre critères (Electre-Tri ou Prométhée) [ROY 85].La méthode de vulnérabilité exposée ne tient pas compte de la nature des polluants, notamment des mécanismes de dispersion des polluants dans la zone saturée (dispersion, adsorption et bio-dégradation). Par ailleurs, une campagne de mesures de polluants serait nécessaire dans le but de vérifier la validité des cartes de vulnérabilité établies.

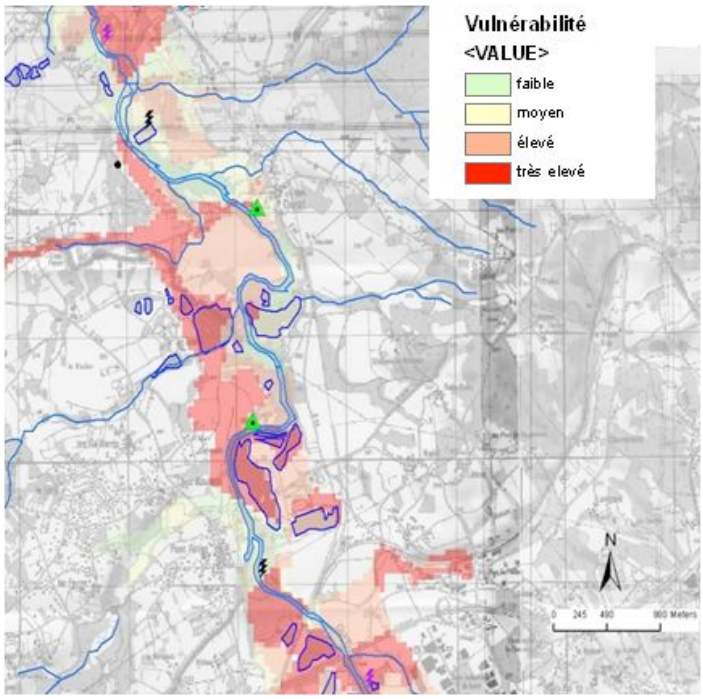


Figure 3 : Carte de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère issue de l'analyse multi-critères

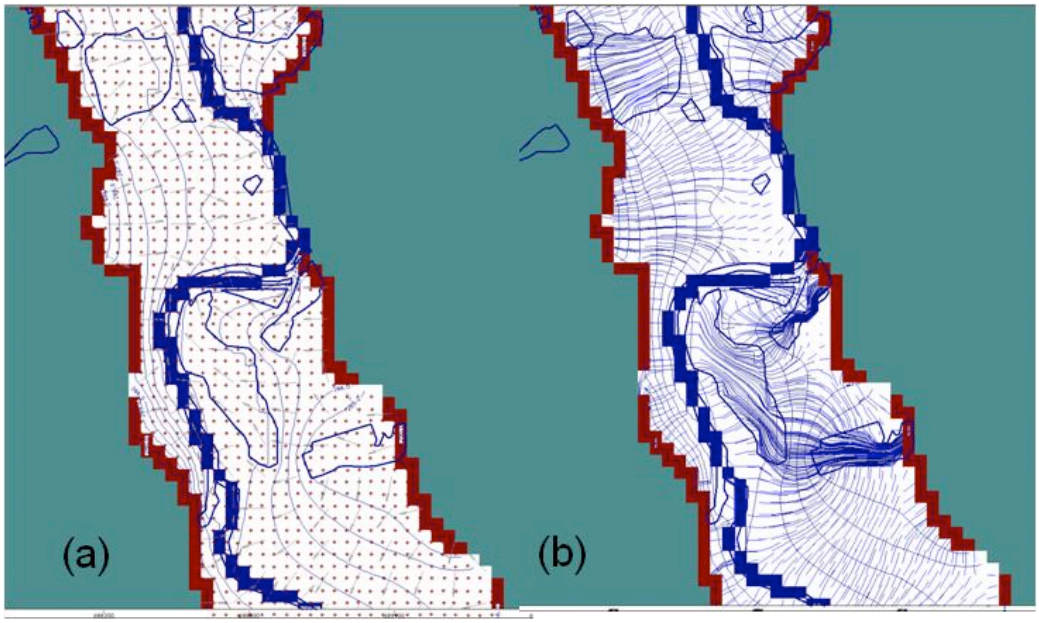


Figure 4 : (4a) Piézométrie calculée en régime permanent. Les lignes grises représentent les isopièzes (équidistance 1 m) et les flèches les directions d'écoulement de la nappe libre. Les points représentent la position de départ des particules de suivi arrière. (4b) Tracé des suivis de particules arrières.

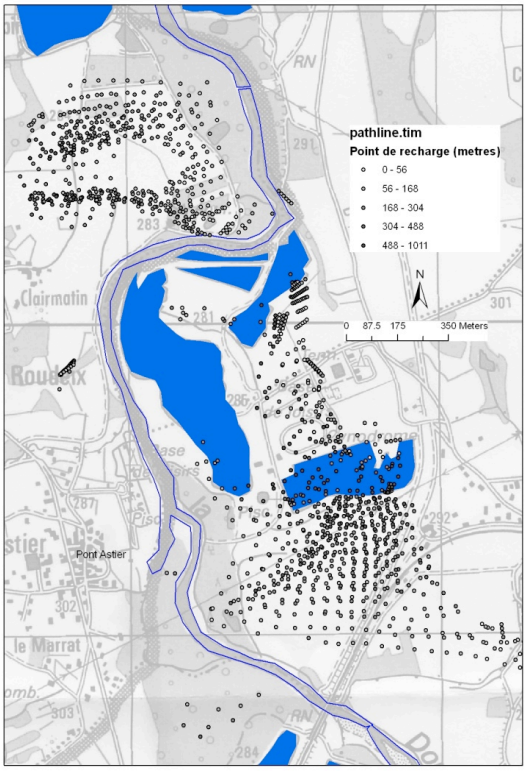


Figure 5 : Carte des distributions spatiales des points de recharge de la nappe libre. Les distances de transfert entre les points de départ et les zones de recharge sont exprimées en mètres.

Bibliographie

[CAS 86] Castany G., 1986 – Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod Université, Paris, 236p.

[CON 08] Conservatoire des Espaces et Paysage d'Auvergne, CRENAM, Juillet 2008 – Etude globale de la plaine alluviale de la Dore. Rapport cartographique pour le Parc Naturel Régional Livradois Forez

[HAM 07] M. Hafedh Hamza, A. Added, A. Frances, R. Rodriguez, 2007 – Validité de l'application des methods de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) in Geosciences de surface (Hydrologie-Hydrogéologie) 339 (2007) p 439-505

[LAU 98] F. Laurent, W. Anker and D. Graillot, Fev 1998 – Spatial modeling with geographic information systems for determination of water resources vulnerability. Application to an area in Massif Central (France) in Journal of the American Water Resources Association, vol 34 n°1, p 123-134.

[MIM 08] Mimoun D., Graillot D., 2008 – Etude des potentialités aquifères de la nappe alluviale dans la basse vallée de la Dore Rapport d'étude pour le Parc Naturel Régional Livradois Forez – Ecole des Mines de Saint-Etienne, 66 p

[ROY 85] Roy B., 1985 – Méthodologie multicritère d'aide à la décision, Economica, Paris

[SAA 84] Saaty T., 1984 Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision. Coll.Université Entreprise, Entreprise Moderne d''Edition.

[SNY 98] Daniel T.Snyder, James M.Wilkinson and Leonard L. Orzol, 1998. Use of a Ground-Water Flow Model with Particule Tracking to Evaluate Ground-Water Vulnerability, Clark County, Washington in Water-Supply Paper 2488 Prepared in cooperation with Intergovernmental Resource Center