

Etude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre (France)

Bernard Blavoux, Stéphane Brusset, Laurent Bruxelles, Laurent Danneville, Michel Lepiller, Alain Mangin, Pierre Marchet

▶ **To cite this version:**

Bernard Blavoux, Stéphane Brusset, Laurent Bruxelles, Laurent Danneville, Michel Lepiller, et al.. Etude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre (France). International symposium - Aquifers Systems Management, May 2006, Dijon, France. 26 p. insu-00699531

HAL Id: insu-00699531

https://insu.hal.science/insu-00699531

Submitted on 21 May 2012

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.

DARCY 97

Etude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre (France)

Bernard BLAVOUX [1], Stéphane BRUSSET [2], Laurent BRUXELLES [3],
Laurent DANNEVILLE [4], Michel LEPILLER [5], Alain MANGIN [6], Pierre MARCHET [7]

1 Université d'Avignon, Laboratoire d'hydrogéologie, Faculté des Sciences,
33 rue Louis Pasteur 84000 Avignon (France) - bernard.blavoux@univ-avignon.fr
2 Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie, UMR 5563 UR 154 CNRS
Université Paul-Sabatier IRD, 14, avenue Edouard Belin - 31400 Toulouse (France) -
stephane.brusset@lmtg.obs-mip.fr
3 INRAP et UMR 8555 «Centre d'Anthropologie» - ZA des Champs Pinsons - 13 rue du négoce -
31650 Saint-Orens-de-Gameville (France) - laurent.bruxelles@inrap.fr,
4 Parc Naturel Régional des Grands Causses, 71 Bd de l'Ayrolle, BP 126 12101
Millau Cedex (France) - laurent.danneville@parc-grands-causses.fr
5 Polytech'Orléans - Ecole Polytechnique de l'Université d'orléans, 8, rue Léonard de Vinci, 45072
Orléans Cedex 2 (France). Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, U.M.R. 6113 CNRS -
Université d'Orléans - michel.lepiller@univ-orleans.fr
6 Laboratoire Souterrain du CNRS, 09200 Moulis (France) - mangin@lsm.cnrs.fr
7 Agence de l'Eau Adour-Garonne, 90 rue du Férétra 31078 Toulouse Cedex (France) –
pierre.marchet@eau-adour-garonne.fr

Abstract
A hydrogeological study was carried out on the whole west part of the Causse de Sauveterre (France) by the Parc des Grands Causses.
Geochemistry, geomorphology, tectonics, and of course quantitative hydrogeology brought many results for a comprehensive approach of this territory, in order to allow the implementation of the mandatory protection perimeters for drinking water resources.

Résumé
Dans le cadre de la protection et de la gestion patrimoniale de la ressource en eau, une étude hydrogéologique a été menée, sous l'impulsion du Parc naturel régional des Grands Causses, sur une unité karstique cohérente : le Causse de Sauveterre dans sa partie ouest (Causse de Séverac, Causse du Massegros et ses avant-causses).

Différents spécialistes ont apporté leur contribution à une approche pluridisciplinaire.

La détermination des bassins d'alimentation des sources importantes a ainsi impliqué la géologie (stratigraphie, analyse structurale et micro-structurale : plans de drainage), la géomorphologie (formes karstiques de surface), dont les résultats ont été confrontés avec les éléments fournis par le bilan hydrologique, l'hydrochimie sur la nature du réservoir et les traçages.

les mêmes disciplines ont été mises en oeuvre pour la connaissance de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et de l'importance de la ressource exploitable au moyen de l'analyse :

- des chroniques de débits (distributions des débits classés fournissant des indices de présence de pertes, de trop pleins et de réserves ; analyses corrélatoires et spectrales et par ondelettes permettant l'évaluation de l'effet mémoire, du temps de régulation et de l'hydrogramme unitaire), des crues, décrues et tarissements (analyse des hydrogrammes fournissant des valeurs de paramètres caractéristiques du fonctionnement de la zone d'infiltration et de l'importance de

la zone noyée), …
- des données hydrochimiques (amplitude des variations, distribution des fréquences de conductivités et des éléments majeurs marqueurs géologiques et marqueurs anthropiques, analyses en composantes principales, utilisation des concentrations de silice comme indice de remplissage détritique ; temps de séjour de l'eau dans le système…)
- de la géologie (lithologie, variations de faciès, géométrie du réservoir, densité et directions préférentielles de la fracturation, remplissage des cavités karstiques)
- de la géomorphologie
- des traçages et en particulier de l'analyse des caractéristiques du transit des traceurs (quantité de traceur restituée, temps de séjour et vitesse du transit, forme de la distribution des temps de séjour , informations fournies par l'évaluation de la section apparente des drains et des volumes d'eau tracés et écoulés avant le début de la restitution)

L'incidence des activités humaines, évaluée à partir de la détermination des activités polluantes existantes ou potentielles (domestiques, agricoles, industrielles, routières, décharges habilitées ou sauvages…) a été croisée avec l'analyse des données hydrochimiques, celle des formations superficielles et les résultats hydrogéologiques (caractéristiques de la zone d'infiltration, degré de karstification, caractéristiques du transit fournies par les traçages).

Cela a conduit à une carte simplifiée de vulnérabilité constituant un outil d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire. Des propositions de zones de protection ont été formulées pour la mise en place des périmètres de protection règlementaires des sources captées pour l'alimentation humaine, contribution qui fera partie du dossier soumis à l'avis de l'hydrogéologue agréé.
Des propositions sont également faites (aménagements, coûts..) afin de diminuer l'impact d'activités polluantes.

Introduction

Dans le cadre de ses missions qui sont notamment la protection, la préservation et la gestion du patrimoine naturel, le Parc naturel régional des Grands Causses s'attache à connaître et préserver la ressource en eau de son territoire. Après le nord-Larzac et le Causse Rouge, il a ainsi lancé cette nouvelle étude hydrogéologique d'envergure sur l'ouest du Causse de Sauveterre, qui s'inscrit dans une continuité visant à terme à la connaissance et la protection de tout son territoire.
L'Agence de l'Eau Adour-Garonne, la Région Midi-Pyrénées et le Ministère de l'Environnement lui ont apporté leur soutien financier pour la réalisation des deux objectifs conjoints de l'étude : la connaissance générale de la ressource, et l'acquisition des informations préalables nécessaires à la délimitation des périmètres de protection réglementaires des points d'eau potable qui captent certaines des sources du territoire étudié.

Pour répondre à ce double objectif, les thèmes abordés ont été :
- la détermination des bassins d'alimentation
- la connaissance du fonctionnement et de la structure des aquifères
- l'évaluation de la ressource en eau souterraine
- l'incidence des activités humaines et les mesures de protection

Les différentes techniques employées ont ainsi pu être avantageusement mises en œuvre à l'échelle d'une unité hydrogéologique cohérente.

Le secteur d'étude

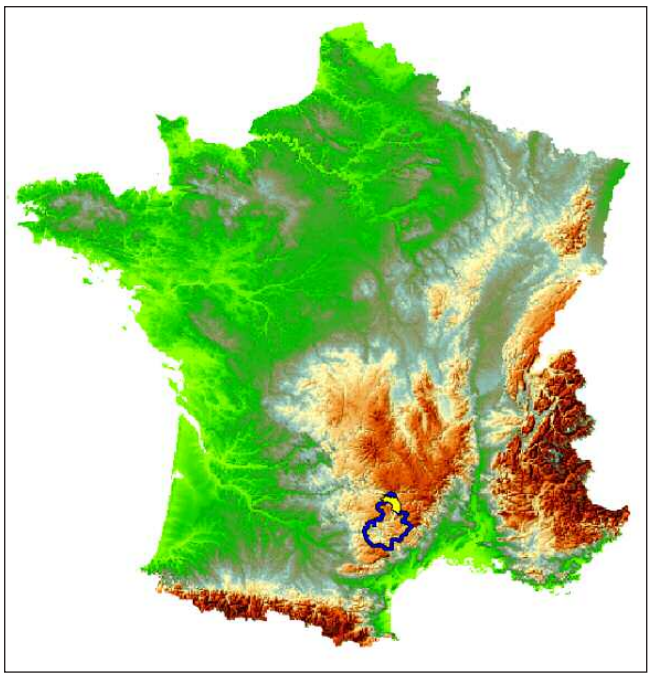


figure 1: Situation du territoire du Parc naturel régional des Grands Causses (bleu) et du secteur d'étude, le Causse de Sauveterre ouest (jaune) - © IGN

L'ensemble karstique des Grands Causses se développe dans la partie méridionale d'un massif primaire hercynien, le « Massif Central » (fig. 1).
Cette zone est caractérisée par de grandes étendues tabulaires de calcaires secondaires, entaillées par d'étroites vallées accidentées et creusées par le Tarn, la Jonte et la Dourbie. Ces rivières isolent, du nord au sud, les quatre unités principales que sont le Causse de Sauveterre, le Causse Méjean, le Causse Noir et le Causse du Larzac (fig. 2).
Le Causse de Sauveterre proprement dit (qui signifie « terre sauvage ») est cerné, au nord par la vallée du Lot, profonde de 200 à 400 m, et au Sud, par les Gorges du Tarn qu'il domine de 500 m sur 60 km de long. Il constitue un vaste croissant pointé vers le sud, d'une étendue d'environ 600 km^2.

La partie ouest du Causse de Sauveterre (400 km^2) est composée du Causse de Séverac, Causse du Massegros et ses « avant-causses » liasiques. Elle intègre 23 communes, dont la plupart sont regroupées en syndicats intercommunaux d'adduction d'eau potable (SIAEP) ou à vocation multiple (SIVOM), tandis que quelques-unes exploitent directe-ment leur captage (régie directe).
L'étude menée de 2003 à 2005 par le Parc des Grands Causses va permettre à ces différentes collectivités de disposer des éléments de connaissance nécessaires à l'hydrogéologue agréé pour délimiter les périmètres réglementaires de protection des captages concernés. Elles pourront ainsi se mettre en conformité avec les obligations qu'impose le Code de la Santé Publique.

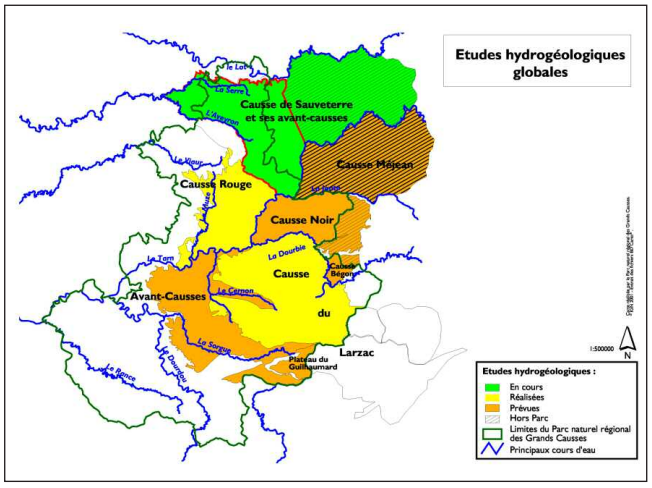


Figure 2 : Les principales unités naturelles des Grands Causses et le territoire du Parc

L'étude de la partie Est (hors Parc) est actuellement en cours, à l'initiative du Conseil Général de la Lozère. Le Parc des Grands Causses lui apporte un appui technique et assurera la synthèse des deux études.

Le territoire étudié comprend environ une centaine de sources (fig 4) dont les 18 plus importantes ont été équipées de stations de mesure et d'enregistreurs durant l'étude, les

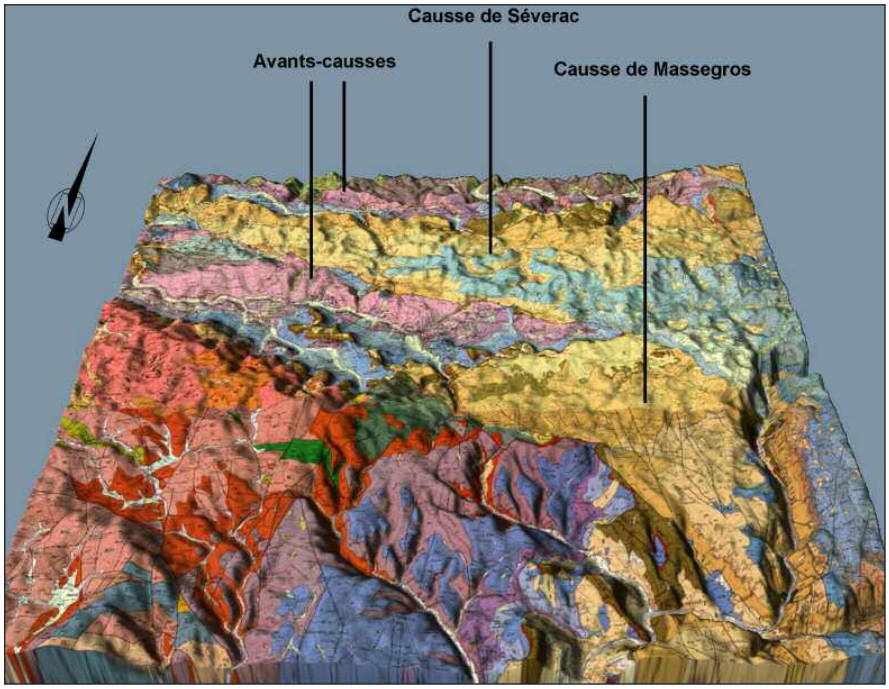


Figure 3 : Contexte géologique et géomorphologique global de la zone étudiée

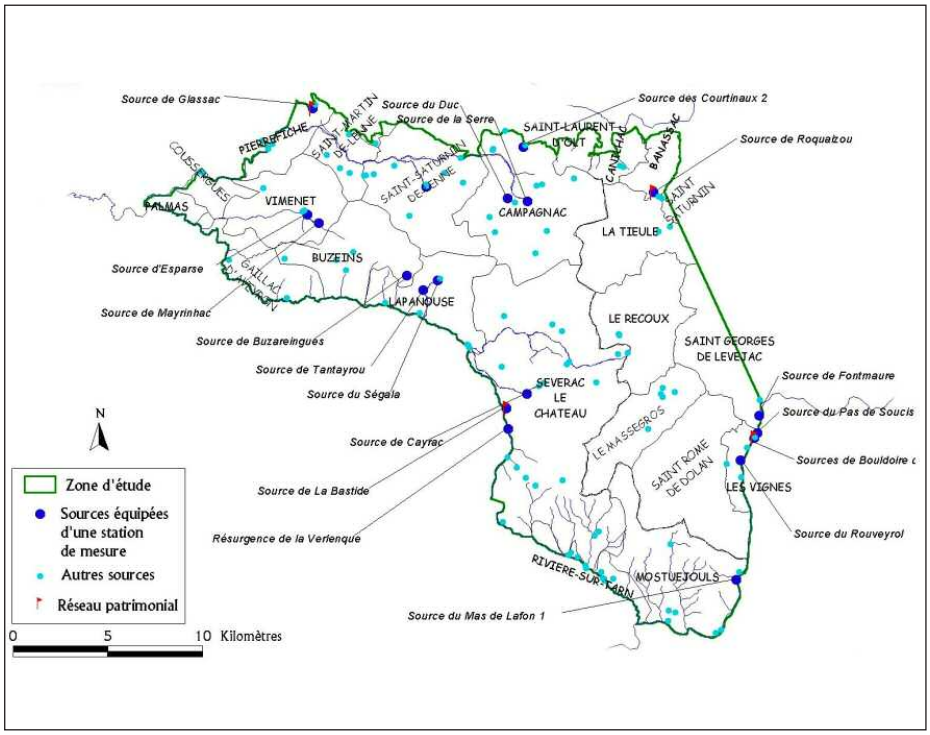


Figure 4 : les sources du Causse de Séverac ouest

autres ont été jaugées ponctuellement (hautes eaux, basses eaux).

Les aquifères concernés

Ils sont divisés en systèmes karstiques avec des apports directs uniquement par les pluies à la surface des sols (systèmes unaires) et des limites à potentiel (ou niveau de base) représentées par le Lot et le Tarn, où les eaux sont ensuite drainées vers les nombreuses résurgences en bordure de la zone d'étude.

La coupe hydrogéologique (fig. 5) des Grands Causses montre deux séries aquifères, supérieure et inférieure, séparées par les marnes du Lias. L'unité inférieure repose par l'intermédiaire du Trias sur le substratum granitique et schisteux réputé imperméable.

La série aquifère inférieure correspond aux formations calcaires et dolomitiques du Lias

(Hettangien-Sinémurien). Quatre des sources étudiées sortent de cet aquifère.
Le niveau réputé imperméable (marnes supraliasiques), pourrait localement permettre des communications, par amincissement de la série ou à la faveur des failles.
L'aquifère supérieur correspond aux formations calcaires et dolomitiques de l'Aalénien au Portlandien. Son drainage est assuré par des émergences localisées au contact des marnes (karst perché) et en bordure des cours d'eau principaux.

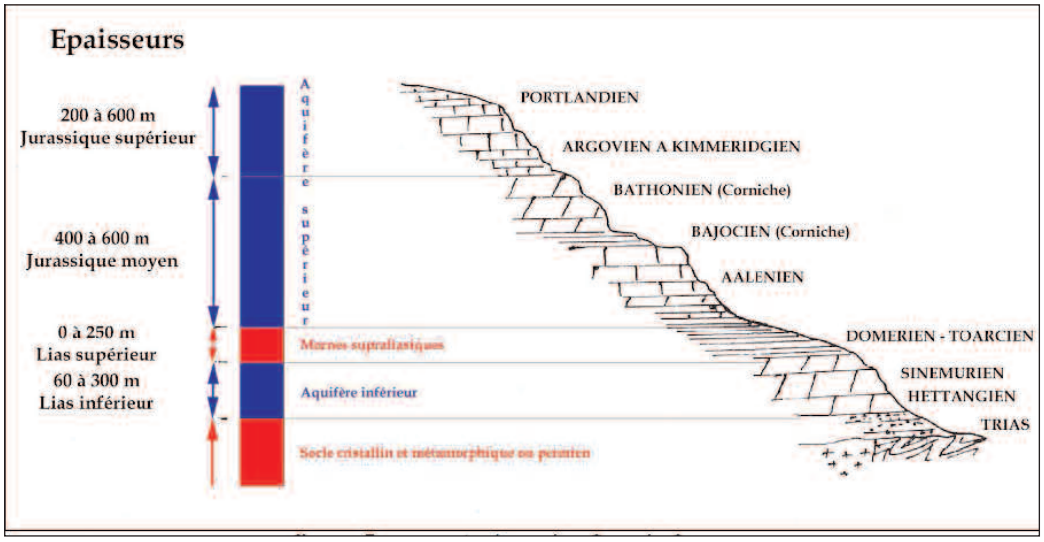


figure 5 : coupe typique des Grands Causses

Détermination des bassins d'alimentation

Dans le karst, les écoulements souterrains actuels ne correspondent pas forcément aux limites topographiques des terrains, reliques d'une morphologie fluviatile ou fluvio-karstique antérieure.

Une première analyse des bassins versants topographiques à partir du Modèle Numérique de Terrain a été comparée aux données issues des débits mesurés aux sources.
Deux campagnes de mesures ont permis de connaître les débits des sources secondaires sur le territoire d'étude. Ces mesures, couplées à celles des 18 stations hydrométriques, permettent de calculer les débits sortants des massifs karstiques (Causse de Sévérac, Causse du Massegros, Avants-Causses) et d'estimer la superficie des bassins hydrogéologiques par zones aquifères principales (lias et dogger), étant donné que toutes les sorties sont, à priori, connues.
Afin d'écarter la part liée à la variation de réserve, un bilan hydrologique a été effectué sur deux cycles hydrologiques (2002-2003 et 2003-2004) pour les stations hydrométriques principales, afin de mieux apprécier les limites des bassins d'alimentation des sources karstiques principales.
Grâce aux débits mesurés sur l'ensemble des sources, une évaluation des superficies a été effectuée.
Deux grands bassins, celui de la Serre et celui de Cayrac ne sont pas en adéquation avec les débits mesurés à la source. Les bassins hydrogéologiques sont nettement moins grands en superficie.
Cette méthode a aussi permis de mettre en évidence d'éventuels apports profonds d'eaux souterraines pour les sources de Tantayrou et Buzareingues. En effet, la superficie des bassins d'alimentation sur la partie liasique ne permet pas non plus d'expliquer les débits à l'exu-

toire. Ces apports profonds peuvent être estimés à 75 % pour Tantayrou et 40 % pour Buzareingues.
Les différences entre les superficies estimées par le bilan aux exutoires et l'analyse du MNT ne permettent pas pour autant de positionner précisément les limites des bassins d'alimentation actuels, élément essentiel de la protection.

Le premier outil pour cela est le résultat des plus de trente traçages réalisés durant l'étude, mais qui laissent, comme on le voit sur l'exemple de la figure 6, des interrogations dans les zones dépourvues de résultats. Pour les traçages, il est en effet toujours difficile de trouver partout des points d'injection, les conditions climatiques ne sont pas forcément favorables, et le temps et les moyens dévolus à une étude sont toujours limités.

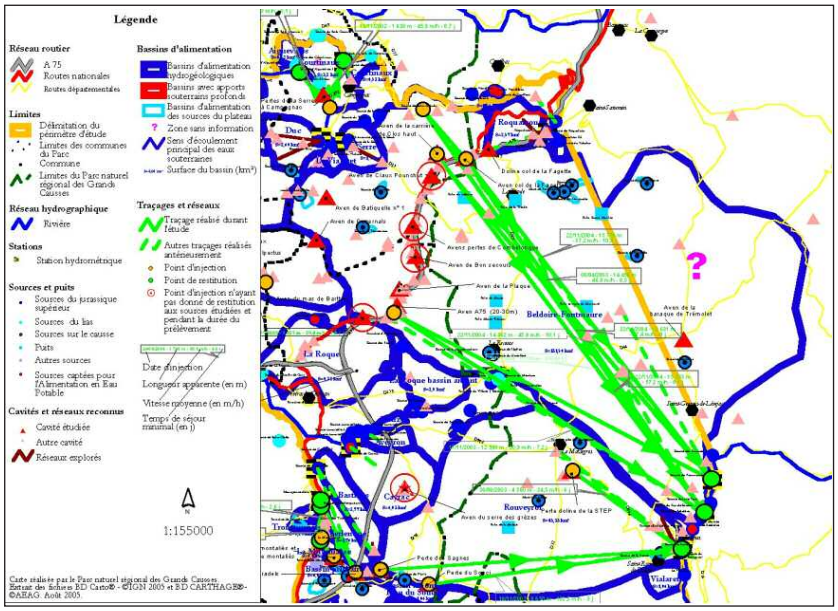


Figure 6 : limite du bassin d'alimentation des sources du Système Beldoire-Fontmaure

Pour apporter la meilleure précision possible, l'ensemble des éléments acquis dans les différentes disciplines ont donc été utilisés. Nous nous limiterons ici à quelques exemples.

Exemples d'apports de la géochimie

Deux campagnes exhaustives d'analyses sur tous les points d'eau (80 à 90 sources) ont été réalisées, à l'étiage en juin 2003 et en moyennes-hautes eaux en mai 2004. Ces analyses ont notamment permis de caractériser les marqueurs chimiques naturels géologiques, et donc de soupçonner, confirmer ou exclure des parties de bassin d'alimentation. Par exemple :

- le rapport molaire Ca/Mg est un bon indicateur du pourcentage des roches dolomitiques dans le système karstique. Compris entre 1 et 2 il indique un milieu essentiellement dolomitique, supérieur à 8 un milieu calcaire alors que deux groupements intermédiaires sont observés indiquant la prédominance des calcaires (entre 5 et 7) et un partage entre calcaires et dolomies (entre 2,5 et 4). Les rapports faibles sont typiques des eaux issues des dolomies, qui sont celles du Lias, à quelques rares exceptions (terminaison Sud-Est du Causse de Massegros où affleurent les dolomies du Kimméridgien et bordure du Causse de Sauveterre quand affleurent les dolomies brunes du Bajocien).
- les fortes valeurs relatives en silice dissoute supérieures à 12 mg/l dans un contexte de teneurs faibles comprises entre 3 et 16 mg/l résultent de la présence sur le bassin versant de formations superficielles spécifiques. Ce sont les épandages allochtones en provenance des terrains siliceux ante-triasiques du massif ancien du Lévezou au Sud et à l'Ouest de la zone d'étude ainsi que les accumulations d'argiles à chailles dans les dépressions des calcaires et dolomies du Bajocien-Bathonien.

On peut également citer un résultat intéressant par son aspect démonstratif, issu de l'autre partie du suivi géochimique, le suivi mensuel des 18 sources principales.

Pour les deux sources de Tantayrou et de Buzareingues, les résultats issus de la comparaison du bilan hydrologique avec les bassins versants topographiques montraient des anomalies. Le suivi géochimique apporte la confirmation de l'origine des eaux de la source de Tantayrou, dont la température la plus élevée de toutes (12,7 °C en moyenne, supérieure de près de 1,8 °C à celle des sources de même altitude), indique un circuit terminal remontant assez profond. Cette température est très constante. Alors que Buzareingues a une teneur en bicarbonates élevée de 340 mg/l, identique à celles du Lias du rebord Nord de l'Avant-Causse, celle de Tantayrou a une teneur de 281 mg/l seulement, la plus faible des sources du suivi. Elle ressemble beaucoup en cela à la source de Cayrac présentant la même minéralisation principale, mais issue du Dogger.
Ainsi donc, si Buzareingues est bien largement alimentée par les dolomies de l'Hettangien qui affleurent vers l'ouest, la source de Tantayrou en situation captive pourrait être alimentée par des remontées depuis le Dogger affaissé dont les affleurements se situent à l'Est et au Nord sur la bordure du Causse de Sauveterre. Il est important de voir comment les failles du réseau des Vignes présentes au Sud et au Nord du site pourraient engendrer une telle situation.
Ces deux sources sont exemptes de pollution anthropique par les chlorures et nitrates et présentent des teneurs en deçà du seuil des teneurs naturelles. Toutefois la source de Buzareingues enregistre une hausse sensible en octobre et novembre, des chlorures et des nitrates et en hautes eaux, d'octobre à janvier, de fortes valeurs relatives en potassium qui est le marqueur du Lias. Ces petits pics sont aussi observés à Tantayrou ce qui fait penser à un mélange des eaux remontant par faille depuis le Dogger avec des eaux du Lias en surface.
On confirme ainsi l'anomalie du bilan hydrologique, et son caractère plus marqué dans un cas (apports profonds estimés à 75 % pour Tantayrou et seulement 40 % pour Buzareingues).

Exemples d'apports de la géologie structurale

Les contraintes tectoniques responsables des grands accidents régionaux observés ont aussi induit une fissuration des roches calcaires, dont le comportement est cassant sous la contrainte. Cette fissuration a eu pour conséquence la création de plans de drainage, à l'origine de la perméabilité de ces roches. L'expérience indique que l'organisation spatiale de tels plans et la perméabilité qui en découle sont très généralement anisotropes (existence de directions préférentielles de drainage). Il importe donc de bien caractériser cette organisation si l'on veut comprendre comment peut s'effectuer la circulation des fluides dans les masses calcaires.
La reconnaissance des plans de drainage et la caractérisation de leur orientation passe par l'analyse microtectonique du plus grand nombre possible de coupes, coupes sur lesquelles sont recherchées des tectoglyphes (failles, veines ou stylolites) et mesurés orientation et pendage de celles-ci. Partant de ces mesures un programme permet de calculer des ellipsoïdes de déformation, dont deux des axes principaux seulement peuvent correspondre à un plan de drainage : plan défini par σ 1 (axe principal de compression) et σ 2 (axe intermédiaire) et nécessairement perpendiculaire à σ 3 (axe de contrainte principale d'extension).

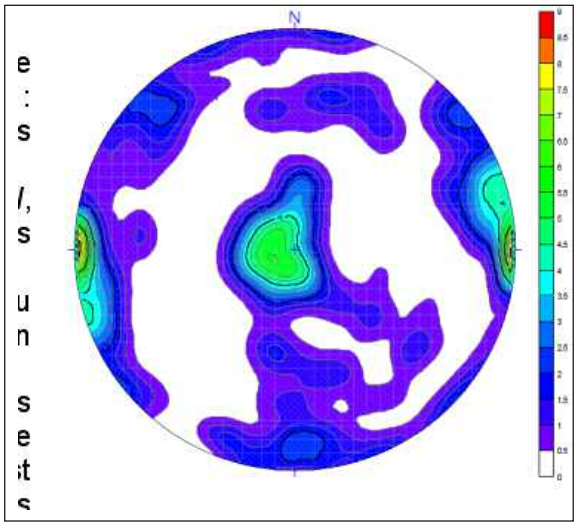


Figure 7 : stéréogramme des plans de drainage du Causse de Séverac

Que ce soit au niveau de l'histogramme ou du stéréogramme on constate l'existence de deux

grandes familles de direction :

- une famille quasi N-S, correspondant à des plans verticaux ;
- une famille d'orientation approximativement E-W, correspondant à des plans verticaux ou beaucoup plus obliques.

Deux directions privilégiées devraient donc se manifester au niveau de la perméabilité : E-W et N-S, ce que la distribution des sources autour du massif confirme pleinement.
Cependant, l'hétérogénéité de la lithologie (calcaires entrecoupés de marnes) pourrait aussi exercer un contrôle sur les écoulements. L'influence de cette hétérogénéité est certainement négligeable pour les écoulements guidés par les fractures verticales, quelle que soit la direction de celles-ci ; mais il pourrait ne pas en être de même pour les fractures obliques, qui ne se trouvent être associées qu'à la direction E-W. Des écoulements latéraux préférentiels selon cette direction sont donc possibles au niveau de certaines discontinuités lithologiques; ceci d'autant plus que le creusement des gorges du Tarn à l'Est du plateau n'a pu que favoriser le phénomène.

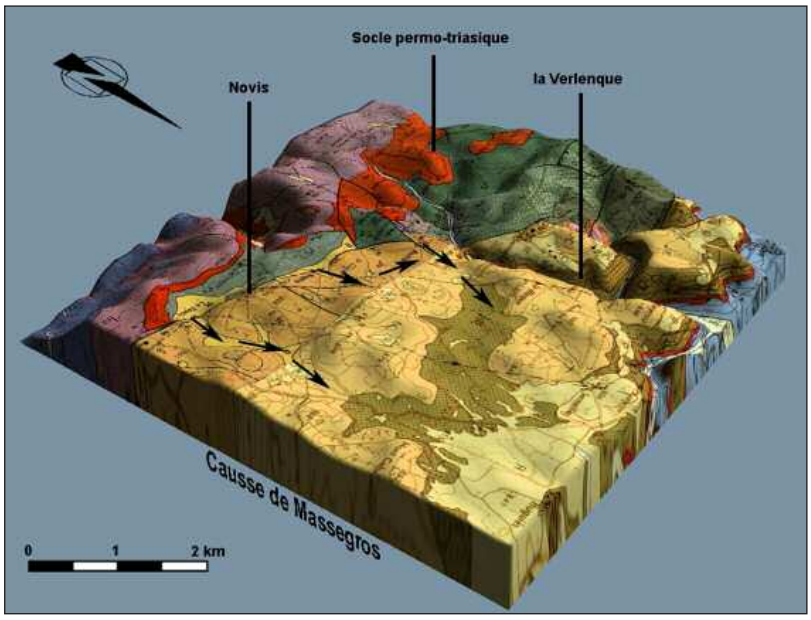


Figure 8 : Vallons fluvio-karstiques prenant leur source sur les terrains permo-triasiques

Exemples d'apports de la géomorphologie

Les vallons fluvio-karstiques du Causse de Massegros se situent tous dans la partie occidentale du Causse, en aval du contact avec les formations permo-triasiques (fig. 8). Ce système de vallées prend donc sa source sur les niveaux imperméables au sud de la faille des Palanges et se dirige en direction du nord. On retrouve dans ces vallées des fragments de grès triasiques ainsi que des pélites permiennes qui confirment bien leur fonctionnement en relation avec l'amont imperméable.
Ces vallées sèches sont en grande partie fossiles. Avec un amont tronqué, elles n'ont plus la possibilité de conserver un cours aérien. Seule la vallée de la Verlenque a pu conserver un écoulement et inciser l'entablement des causses au fur et à mesure de l'abaissement du niveau de base. Ceci a été possible car son bassin-versant amont n'a pas encore été capturé par les vagues d'érosion régressive déclenchées par le creusement du Tarn. Des poljés de bordures se sont alors développés, profitant de la zone broyée des la faille des Palanges et de l'abondance de matériel érodé sur les versants permiens. Enfin, le drainage hypogé de ce secteur vers la source du Rouveyrol matérialise bien la capture progressive de ces écoulements vers le Tarn alors qu'ils alimentaient à l'origine le bassin-versant de l'Aveyron.

Dans la plupart des cas les positions exactes des limites ne peuvent pas être connues de façon rigoureuse, malgré l'emploi des différents outils. Aussi, ce sont des limites de bassin assez épaisses qui ont été mises en place (zones d'incertitude), parfois de 500 m de largeur.

Connaissance du fonctionnement et de la structure des aquifères

Apports de l'étude des débits

Les données de débit ont été acquises sur les 18 sources principales sur au moins deux cycles hydrologiques (cycles 2002-2003 et 2003-2004). On citera deux exemples d'analyse :

- Le rapport Qj max/Qj min est indicateur d'une régulation et de la karstification. C'est la source de Cayrac qui possède le rapport le plus bas (3), signe d'une karstification peu développée et/ ou d'une régulation des débits importante. A l'inverse, on trouve des rapports supérieurs à 100, indice d'une karstification prononcée, pour les sources Courtinaux, Roquaizou, Serre, Lestang et Verlenque.
- Le corrélogramme croisé, dans le cas ou la fonction d'entrée peut être considérée comme aléatoire (cas de la pluviométrie), repré-sente la réponse impul-sionnelle du système (ou hydrogramme unitaire).

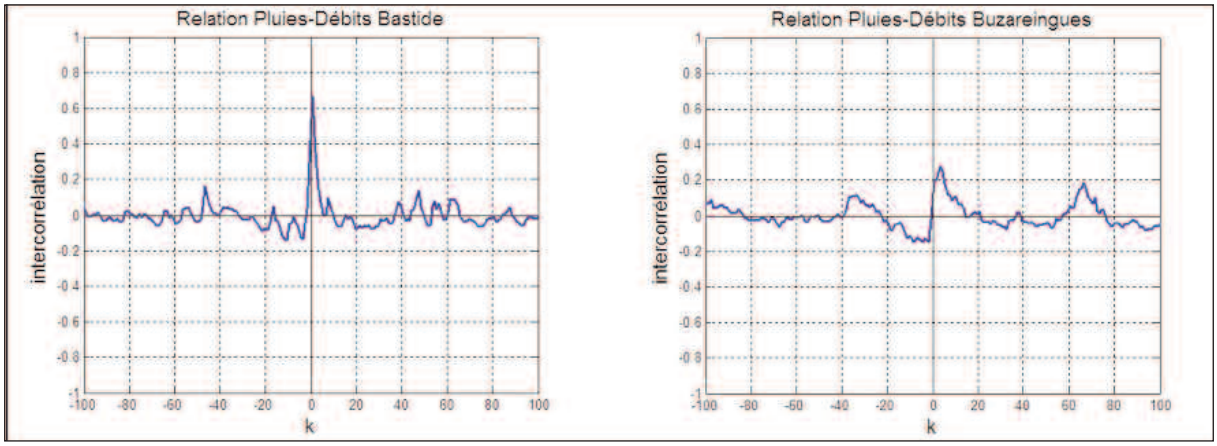


Figure 9 : corrélogrammes croisés pluie-débits

On peut distinguer deux types de réponses : la première très aigüe et peu étalée correspondant à des écoulements rapides, donc à des aquifères bien karstifiés. La seconde plus étalée, avec une pointe moins haute, où les aquifères seraient moins bien karstifiés. (cf exemples fig. 9).
Les différentes analyses effectuées sur les séries chronologiques de débits des 18 sources permettent d'acquérir des informations précises sur le fonctionnement des aquifères qu'elles drainent.

Globalement toutes les sources présentent dans leur comportement une forte parenté : les réponses en général indiquent une assez bonne réponse à la pluie, indice d'une karstification développée, mais avec une traîne qui indiquerait la présence de réserves non négligeables.
Il est cependant possible, en partant des différents critères examinés, de distinguer deux groupes. Ces critères sont la forme des réponses impulsionnelles (corrélogrammes croisés) que ce soit à l'échelle journalière, mais de façon encore plus marquée à l'échelle semi-horaire, la répartition des composantes suivant le court et le long terme, la loi utilisée pour les débits classés et la comparaison des spectres.
Le premier groupe serait relativement bien karstifié, alors que le second le serait moins. La distinction entre ces groupes ne paraît relever ni d'un critère géologique, ni d'un critère pétrologique ni même d'une situation géographique particulière. Le critère de discrimination se rapporte à autre chose et c'est probablement l'histoire géomorphogique de ce secteur qui peut nous apporter une réponse. On constate que pour le groupe apparaissant comme le plus évo-

lué avec les écoulements les mieux organisés, la réponse semble composite (double réponse). Il est possible que le 2e groupe possède un degré de karstification aussi développé que le premier groupe, mais il serait alors moins fonctionnel à cause du colmatage de la zone d'émergence (évolution géomorphologique récente).

Dans le comportement global de l'ensemble aquifère apparaît un autre point important, c'est la présence d'un niveau de base très bas constitué par la vallée du Tarn. Les sources sont réparties au nord et au sud du massif carbonaté et à l'est au niveau du Tarn.

- Pour les organisations au nord et au sud du massif de Sauveterre l'existence de plans de drainage orientés N-S justifie cette disposition. Comme ces plans sont verticaux on comprend que l'hétérogénéité lithologique ne joue aucun rôle. Il existe de plans de drainage avec une dispersion de plus de 36° suivant cette orientation.
- Pour les sources situées en bordure du Tarn là aussi existent de nombreux plans de drainage orientés suivant la direction de l'écoulement, donc le drainage des eaux dans cette direction est tout à fait possible. En revanche, ces plans sont pour la plupart faiblement inclinés. De ce fait l'écoulement se fera préférentiellement suivant certaines couches. L'aquifère à ce niveau risque d'être multicouches. Or, pour Fontmaure apparaît une composante semi-diurne due sans doute à la marée terrestre, indiquant qu'il existerait des conditions de captivité de l'aquifère, confirmant cet aspect multi-couches. Là aussi, la dispersion des plans de drainage suivant cette direction, s'effectue sur un éventail d'angles supérieurs à 36° (de 45 à 120°).

La mise en place d'un karst obéit à une loi fractale faisant apparaître des symétries d'ordre 5 ; et l'existence d'angles supérieurs à 36° entre deux principales directions d'écoulement a pour conséquence le développement de réseaux anastomosés et bien développés selon chacune de ces directions. Le karst de Sauveterre pourrait donc, éventuellement, présenter un double comportement hydrodynamique, que nous confirment l'analyse des débits, mais aussi les traçages.

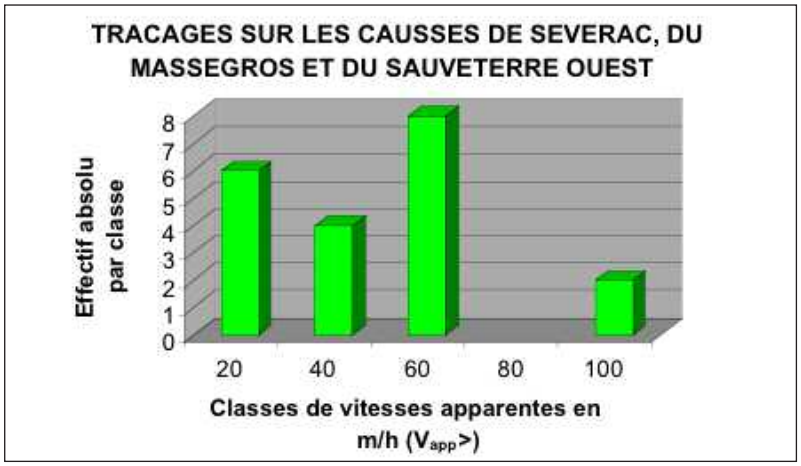
Enfin au niveau du Tarn, les altitudes sont basses (395 m au Rozier), c'est à dire que le gradient hydraulique est maximal suivant cette direction. Dans ces conditions, à plus ou moins long terme, tous les écoulements du massif de Sauveterre prendront cette direction avec capture progressive des systèmes karstiques situés plus à l'Ouest. Ce mécanisme a commencé comme le montrent les traçages, mais surtout les valeurs des débits, puisque les sources les plus importantes sont Beldoire, Rouveyrol et Fontmaure.

Apports de la chimie des eaux

La concentration moyenne en HCO3 des sources du karst de Sauveterre en étiage (317 mg/l) est élevée par rapport aux concentrations connues sur d'autres régions karstiques, Jura (280 mg/l), Fontaine de Vaucluse (260 mg/l) et aussi le Larzac proche (250 mg/l). Des teneurs supérieures à 350 mg/l sont même atteintes pour les sources issues d'un réservoir dolomitique. Ces résultats indiquent des temps de séjour longs permettant d'approcher la saturation vis à vis de la calcite, et font donc penser à des circulations assez lentes dans un réseau de drainage moyennement développé.

Apports des traçages

Les vitesses apparentes déduites des distributions des temps de séjour (fig. 10) ne dépassent pas 100 m/h. Les valeurs les plus élevées ont été mesurées sur des systèmes traçages dont l'entrée est une perte fonctionnelle. On notera l'homogénéité des valeurs obtenues pour le système de Beldoire dans des conditions hydrologiques variées (très basses à moyennes



fFigure 10 : Distribution des vitesses apparentes mesurées à partir des traçages

eaux) à partir de points d'injection diversement situés. Cette homogénéité et le niveau plutôt moyen des valeurs mesurées suggèrent l'existence d'un réseau de drainage moyennement développé et alimenté en permanence par de puissantes réserves.

Ainsi l'information acquise aux exutoires des systèmes karstiques (débits, chimie, traçages) apporte de nombreuses informations, globalement assez cohérentes (seule une faible partie des résultats est présentée ici).

Evaluation de la ressource en eau souterraine

Les résultats du calcul des *volumes dynamiques* montrent :

- Des volumes forts, supérieures à 1,5 Mm^3 pour Beldoire et Cayrac impliquant la présence de réserves souterraines considérables;
- Des volumes compris entre 0,5 Mm^3 et 1,5 Mm^3 pour Bastides, Lestang, Mayrinhac, Ségala et Verlenque ;
- Des volumes plus faibles, inférieur à 0,5 Mm^3 pour les autres sources.

Dans le but de comparer les systèmes karstiques en fonction des caractéristiques de leur zone d'infiltration et de leur zone noyée, les résultats de l'analyse des courbes de récession de 2004 ont été replacés dans la classification établie par A.Mangin. Cette classification fait appel à deux coefficients : k et i.

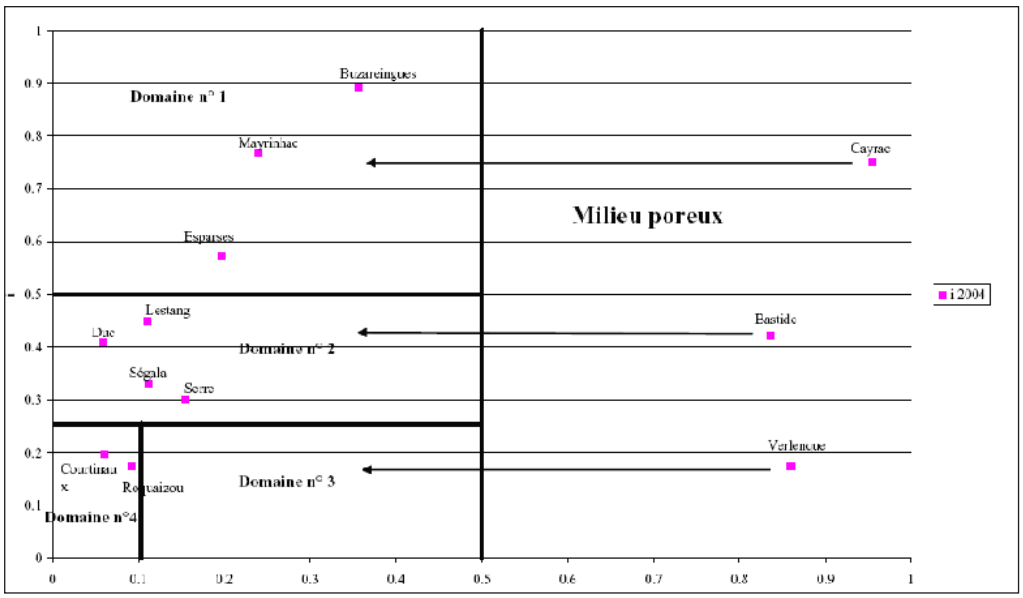


Figure 11 : position des systèmes karstiques étudiés dans la classification de Mangin

- k traduit l'aptitude du système à stocker les précipitations et à les restituer. Plus ce pouvoir régulateur est élevé, plus le coefficient k tend vers 1. Cette dernière valeur représente le cas des aquifères poreux où le volume dynamique et quasiment égal au volume en transit. Dans le cas des systèmes karstiques, k est en général inférieur à 0.5 et une valeur proche de 0 traduit un pouvoir régulateur négligeable.
- i traduit les retards à l'infiltration. Une forte valeur de i est significative d'une infiltration lente ou de l'influence d'un aquifère épikarstique. Une valeur faible de i est le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée.
- Pour le domaine n° 4 correspondant à des systèmes karstiques très karstifiés en aval, domaine des réseaux spéléologiques très développés, on trouve les sources de Courtinaux et Roquaizou.
- Pour le domaine n° 2 correspondant à des systèmes plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval, avec des retards à l'alimentation dus à des terrains non karstiques, on trouve les sources du Duc, Ségala, Serre et Lestang ;
- Pour le domaine n° 1 correspondant à des systèmes complexes, qui sont généralement les systèmes de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes, on trouve les sources d'Esparses, Mayrinhac et Buzareigues.

En revanche, 3 stations se situent au-delà de k=0.5 (Verlenque, Bastide, et Cayrac). Ce sont des sources proches, issues de la partie Nord-Ouest du Causse de Massegros. Elles correspondent à des systèmes à comportement de milieu poreux avec un i croisssant de Verlenque à Cayrac.
Ces résultats doivent être pris très prudemment car fonction du seul cycle 2004. L'analyse de plusieurs cycles hydrologiques permettra de confirmer ou d'infirmer cette classification.

Incidence des activités humaines et mesures de protection

L'apport des données hydrochimiques

Les campagnes exhaustives et tout particulièrement celle d'étiage ont permis de caractériser et de distinguer les marqueurs chimiques naturels géologiques, des éléments anthropiques introduits dans les systèmes karstiques par les activités agricoles et urbaines.

La répartition statistique des teneurs en chlorures montre que l'impact anthropique est perceptible au-delà du seuil de 4 mg/l hérité des seules précipitations efficaces. Les teneurs restent cependant faibles et l'impact anthropique n'est manifeste que pour les teneurs supérieures à 12 mg/l dont 5 échantillons dépassent 25 mg/l. Ces points se localisent à proximité d'un axe de communication et/ou d'une agglomération, indépendamment de la géologie.

Pour les nitrates, plus de la moitié des échantillons (51/92) présente des teneurs inférieures à 6 mg/l en NO_3 qui est le seuil au-delà duquel sont perceptibles les impacts de l'activité humaine (engrais, effluents d'origine animale ou humaine rejoignant les circulations karstiques via les stations d'épuration ou même directement). 5 sources seulement dépassent 25 mg/l et une seule 50 mg/l. Les teneurs excessives se localisent dans les dépressions liasiques des vallées de l'Aveyron et de la Serre (rebord de l'avant-Causse) qui sont des axes de communication avec urbanisation et des zones de culture.

La corrélation entre chlorures et nitrates (fig. 12) bien exprimée pour la campagne de hautes eaux et lors du suivi mensuel, n'est qu'à peine esquissée pour la campagne d'étiage. La croissance simultanée de Cl et NO_0 indique un impact des eaux usées d'origine humaine ou animale. Une évolution verticale traduit l'apport très majoritaire de chlorures résultant du salage

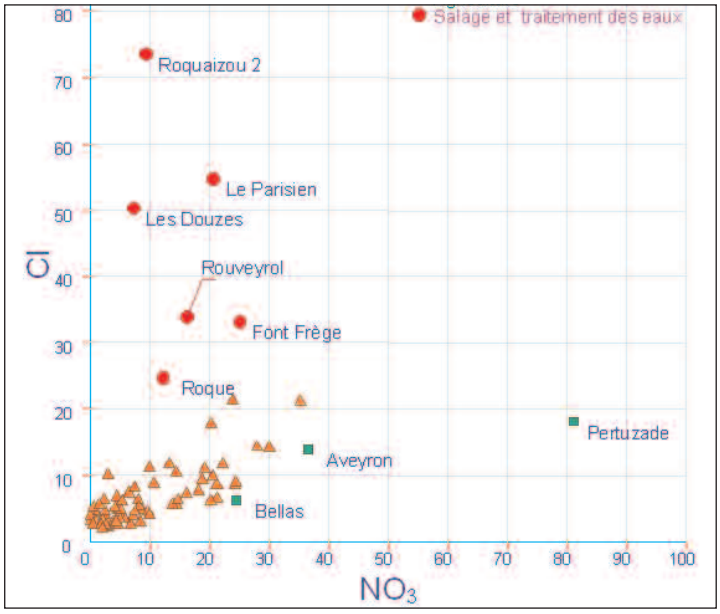


Figure 12 : corrélation chlorures-nitrates

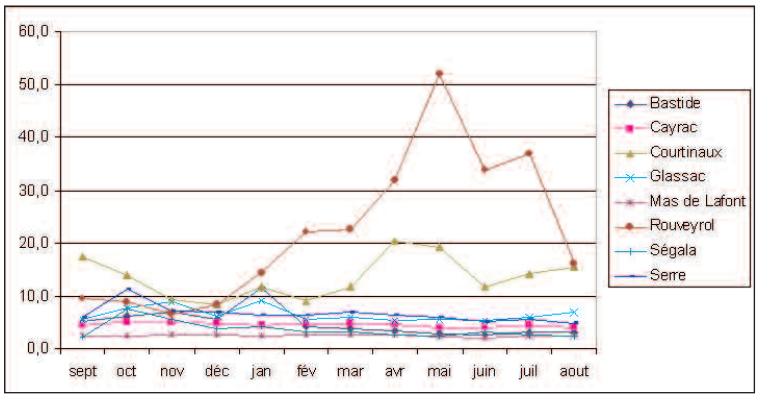


figure 13 : Chlorures

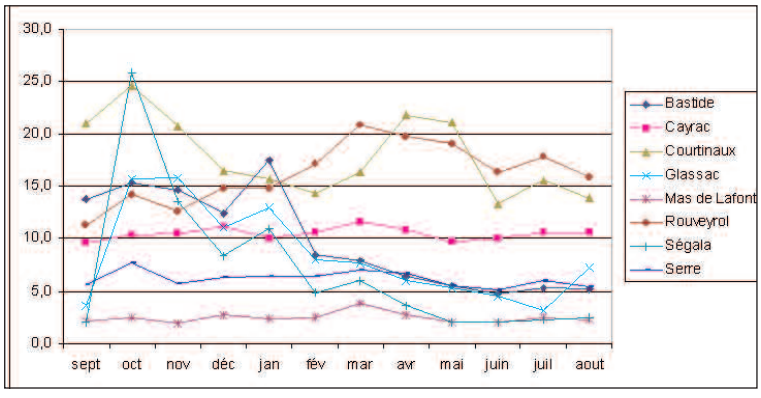


figure 14 : Nitrates

des routes ou du traitement par le chlorure ferrique des effluents de la station d'épuration du Massegros qui atteignent les sources de Rouveyrol et le Parisien. La position bien en dessous de la tendance générale indique un impact prépondérant de l'agriculture.

Le suivi et la comparaison des variations des paramètres physico-chimiques des 18 sources au cours d'un cycle hydrologique permettent de préciser leur fonctionnement, les raisons de l'état qualitatif du système et la manière dont les éléments anthropiques parviennent à l'exutoire La présence des éléments anthropiques renseigne sur la vulnérabilité du système, mais

la pollution peut se manifester, soit de façon chronique ce qui indique la détérioration de la qualité des réserves ou la permanence de fortes entrées polluantes dans le système karstique, soit de façon accidentelle ou répétitive.
Par exemple en ce qui concerne les chlorures (fig.13) certaines sources présentent des teneurs constantes tout au long du cycle hydrologique et des états satisfaisants. D'autres présentent des augmentations faibles mais significatives en novembre, octobre et janvier lors de petites crues, traduisant leur vulnérabilité. A l'inverse deux sources polluées, Courtinaux et Rouveyrol connaissent des baisses de leurs teneurs en hautes eaux qui peuvent être interprétées comme la dilution d'un flux polluant se déversant en permanence dans le système. L'hypothèse de réserves de très mauvaise qualité peut être écartée en raison des variations importantes observées durant un long étiage.

En ce qui concerne les nitrates ce sont les trois mêmes sources qui présentent une grande constance. Presque toutes les autres connaissent une augmentation des teneurs en nitrates surtout lors des premières crues d'automne en octobre, novembre mais aussi en janvier, avec des amplitudes croissantes de Glassac, Bastide jusqu'à Ségala, confirmant ainsi leur vulnérabilité déjà entrevue avec les chlorures. Les sources polluées de Rouveyrol et Courtinaux accusent, comme pour les chlorures, de fortes concentrations en étiage confortant l'idée d'un déversement permanent et conséquent d'eaux usées dans leur réseau. Celle de Courtinaux avec également de fortes teneurs de septembre à novembre est aussi vulnérable au lessivage des sols en automne.

L'étude géomorphologique a démontré que les argiles à chailles constituent des sols profonds et les paysages bocagers qui s'y trouvent contrastent fortement avec l'aridité des autres secteurs. L'activité humaine s'y concentre depuis des milliers d'années et les premiers déboisements sur les ségalas ont provoqué d'importants phénomènes de colluvionnement en direction des points bas. Une partie de la couverture d'argiles à chailles a donc été restaurée à cette époque, masquant l'existence de dolines et d'avens. Cet héritage, ainsi que la tendance à la verticalisation du karst rend cette couverture extrêmement sensible. Ainsi, toute concentration de l'eau en surface tend au débourrage du karst sous-jacent. Plusieurs exemples récents, notamment pendant les travaux de l'autoroute A 75 au niveau de l'Hospitalet-du-Larzac, sont venus illustrer ce postulat. En outre, le remembrement, qui a fait disparaître tout ce qui pouvait favoriser l'infiltration diffuse, l'existence de grandes surfaces imperméabilisées (parking, voirie), ainsi que le rejet des eaux usées contribuent au décolmatage et à l'absorption massive d'effluents pollués.

Un inventaire des activités potentiellement polluantes (pression anthropique) a été réalisé. Une carte de vulnérabilité et une carte des dangers (croisement de la vulnérabilité et de la pression anthropique) ont ensuite été dressées, en tenant compte de l'ensemble des résultats (chimie, traçages, etc…).

Conclusion

L'intérêt de cette étude ne réside pas dans la nouveauté des méthodes employées, même si certaines ne sont pas encore exploitées en routine. Son caractère singulier est plutôt le double aspect :
de l'approche à l'échelle d'une unité hydrologique cohérente ;
de la mise en œuvre de diverses disciplines complémentaires des sciences de la terre, et du dialogue qui a pu s'instaurer entre celles-ci au moment de la comparaison des résultats.

DARCY 112

Cartographie de la vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Application aux sites BASOL

MARDHEL Vincent1, GRAVIER Annabel1, KOCH-MATHIAN Jean-Yorick[1], NOWAK Céline1, TERREYRE Jean-Luc[2], RAGUET Mireille3, GARNIER Cécile[3]

[1] BRGM, BP6009, 45060 Orléans cedex 2, France, v.mardhel@brgm.fr ; jy.kochmathian@brgm.fr
[2] MEDD, 20 av. de Ségur, 75302 Paris 07 SP, France, jean-luc.terreyre@ecologie.gouv.fr
[3] Agence de l'Eau Seine-Normandie, 51, rue Salvador Allende, 92027 Nanterre Cedex, France, raguet.mireille@aesn.fr ; garnier.cecile@aesn.fr

BASOL : BAse des Sites et SOLs pollués, ou susceptibles de l'être, sur lesquels l'administration a engagé une action.

Abstract

The index of persistence and development of networks (IDPR) was created to carry out national or regional maps of vulnerability. It translates the aptitude of the geological formations to let to flow or to infiltrate surface water. IDPR is based on the analysis of the drainage network (calculated by DEM) and the natural hydrological flow .This concept is a indirect approach of infiltration and it is necessary in the development of any map of vulnerability. Finally the IDPR can replace many criteria usually employed in the use of vulnerability methodologies to produce maps.

The map of vulnerability described now was produced with the IDPR. It's related to the territory of the Agency of basin Seine-Normandy. The methodology was validated within a working group made up of the representatives of the MEDD, agency of water, DIREN, DRIRE and BRGM. Since then, the territories of the Agency of water Loire-Bretagne, of the areas Nord-Pas-de-Calais and Aquitaine were treated with the same approach. The Agency of Rhone-Mediterranée-Corse has index IDPR since 2003.

The vocation of this method is not to replace maps of vulnerability at high scale, the precision of DEM and rivers network does not allow it, it constitutes an indicator of a general state of vulnerability. The map obtained must be interpreted not as a reflection of an absolute vulnerability but as a construction of a hierarchy of the systems relative to their vulnerability. This hierarchisation allowing to target the priority zones as regards protection of the resource. The application to the specific polluting pressures such as those related to sites BASOL, carried out in 2005 on the Seine-Normandy basin in partnership with the MEDD and the agency of water, showed the interest of such total maps to contribute to the establishment of the priorities of monitoring and interventions. The other prospects for use are numerous, in particular for the installation of the follow-up of the quality of subsoil waters downstream from the Installations Classified in the vulnerable zones.

Résumé

L'Indice de Persistance et de Développement des Réseaux (IDPR) a été créé pour réaliser des cartes nationales ou régionales de vulnérabilité. Il traduit l'aptitude des formations du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface et se fonde sur l'analyse des réseaux hydrologiques et celle du MNT 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.

La première carte de vulnérabilité produite avec l'IDPR a porté sur le territoire de l'Agence de bassin Seine- Normandie, la méthodologie 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 est décrite dans cet article. Depuis lors, 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.
La vocation de cette méthode n'est pas de se substituer aux cartes de vulnérabilité d'échelle infra départementales, la précision des données ne le permet pas, elle constitue un indicateur d'un état général de vulnérabilité. La carte obtenue doit être interprétée non pas en tant que reflet d'une vulnérabilité absolue mais en tant que construction d'une hiérarchie des systèmes relativement à leur vulnérabilité. Cette hiérarchisation permettant de cibler les zones prioritaires en matière de protection de la ressource. L'application aux pressions polluantes ponctuelles telles que celles liées aux sites BASOL, réalisée en 2005 sur le bassin Seine- Normandie en partenariat avec le MEDD et l'agence de l'eau, a montré l'intérêt de telles cartes globales pour aider à l'établissement des priorités de surveillance et d'interventions. Les autres perspectives d'utilisation sont nombreuses, en particulier pour la mise en place du suivi de la qualité des eaux souterraines en aval des Installations Classées dans les zones vulnérables.

Le réseau hydrographique

«Le réseau hydrographique correspond à tout écoulement linéaire concentré sur la surface topographique qu'il transforme progressivement. Il représente un état du cycle de l'eau, celui de l'écoulement qui suit le chemin le plus facile, minimisant sans cesse leur entropie » (Deffontaines, 1990).
En 1972, Robert Prud'homme, un des précurseurs français en matière d'analyse des réseaux hydrographiques, 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». Il 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 expérimente donc l'analyse cartographique des réseaux hydrographiques et donne un certain nombre de corrélations très pertinentes. Kim Woo-Gwan, poursuit ces travaux et approfondit l'analyse des réseaux hydrographiques. Dans les années 1990, Deffontaines insiste sur l'intérêt du réseau hydrographique pour une approche morphostructurale : «Le réseau hydrographique est principalement modifié par la lithologie et la fracturation». En parallèle, Riazanoff 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. 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 :
La lithologie : elle intervient par sa nature physique : épaisseur, perméabilité, etc., et sa nature chimique : sensibilité à la dissolution, phénomènes de cristallisation, etc.
La structure : les alternances géologiques, les discordances, les déformations affectent la lithosphère, modifient la topographie et façonnent le réseau hydrographique.
La pente régionale : définie par un sens, une direction puis une inclinaison, elle est un élément déterminant dans l'orientation et l'organisation des cours d'eau.
D'autres facteurs interviennent résultants d'une combinaison de contraintes de nature diverse, leur importance diffère selon l'échelle à laquelle on observe le réseau hydrographique, on ne mentionnera pour mémoire que le rajeunissement et l'eustatisme. Ainsi, au delà de sa morphologie, le réseau hydrologique par sa morphogenèse suppose la recherche d'éventuelles corrélations entre la forme du réseau hydrographique et la nature du sous-sol. Celle-ci a suscité un grand nombre de travaux et l'hypothèse principale qui les sous tend suppose que les

réseaux hydrographiques conservent, dans leurs formes, la signature de phénomènes endogènes ou exogènes.

Définition de l'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux), morphologie vs morphogenèse

Les travaux cités précédemment montrent qu'au-delà de l'objet géographique, le réseau hydrographique peut être appréhendé comme un objet morpho structural dont la genèse montre des corrélations entre causes et forme. L'IDPR s'intéresse à ces corrélations et met en exergue celles qui sont supposées d'ordre géologique. Arbitrairement, cette approche minimalise les autres facteurs et cela même si le climat (paléoclimat), la végétation, l'action de l'homme ont un rôle important dans l'évolution du tracé des cours d'eau. Ainsi 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. Dans la réalité, ce réseau hydrographique théorique diffère du réseau naturel et cette différence traduit la complexité du milieu naturel. L'idée qui sous tend l'IDPR découle donc du postulat suivant,
Si l'organisation du réseau de drainage, des talwegs, dépend du modelé des terrains naturels ; si l'organisation du réseau hydrographique dépend du contexte géologique qui le supporte : alors l'écart entre le réseau des talwegs et le réseau hydrographique traduit l'influence du milieu souterrain. Ainsi, un bassin formé de matériaux très perméables aura en général un réseau hydrographique de densité faible comparativement à la densité des talwegs calculés. A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, des marnes par exemple, va souvent présenter un réseau hydrographique de densité plus élevée. L'IDPR devient ainsi un moyen de quantifier indirectement la fonction de transfert des eaux météoritiques depuis la surface vers le sous-sol. Il compare 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**). Il présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux et rend compte du rôle du milieu souterrain dans l'établissement du réseau hydrologique et va alors être exploité pour approcher de manière indirecte, la capacité intrinsèque des terrains à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface.

Couches d'informations nécessaires

Venus du monde des géographes universitaires, repris par de grands projets dont la réalisation à conduit à l'acquisition d'un volume important de données qui fallait gérer dans le temps et l'espace, les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) sont développés depuis les années 80 pour la digitalisation, la conservation, l'analyse et à la synthèse de l'information géographique. Si de nombreux scientifiques, géologues, géographes, hydrologues ou géomorphologues ont défini, dès les années 50, des modes d'analyse des réseaux hydrographiques, ce type d'analyse n'a jamais vraiment été utilisé autrement qu'à titre expérimental ou de manière parcimonieuse jusqu'aux années 80. Ce peu d'utilisation s'explique alors par la longueur des calculs manuels et l'inadaptation des moyens pour l'automatisation de ces analyses. La montée en puissance des SIG a porté depuis lors largement l'accent sur l'automatisation de l'extraction du réseau hydrographique à partir de modèle numérique de terrain (MNT). L'IDPR propose de réunir l'approche d'automatisation de l'analyse des réseaux hydrographique avec les travaux de digitalisation des réseaux naturels.

Le réseau naturel

Dans le cadre de l'étude présentée en Seine-Normandie, le réseau hydrologique naturel, utilisé dans la démarche de calcul de l'IDPR provient des données de la BD CARTHAGE IGN© (fig.1). Les attributs exploités pour l'analyse sont l'état et la nature des cours d'eau.

Le réseau théorique

Le réseau théorique des écoulements est fondé sur l'analyse des talwegs (fig.2). Il s'établit à

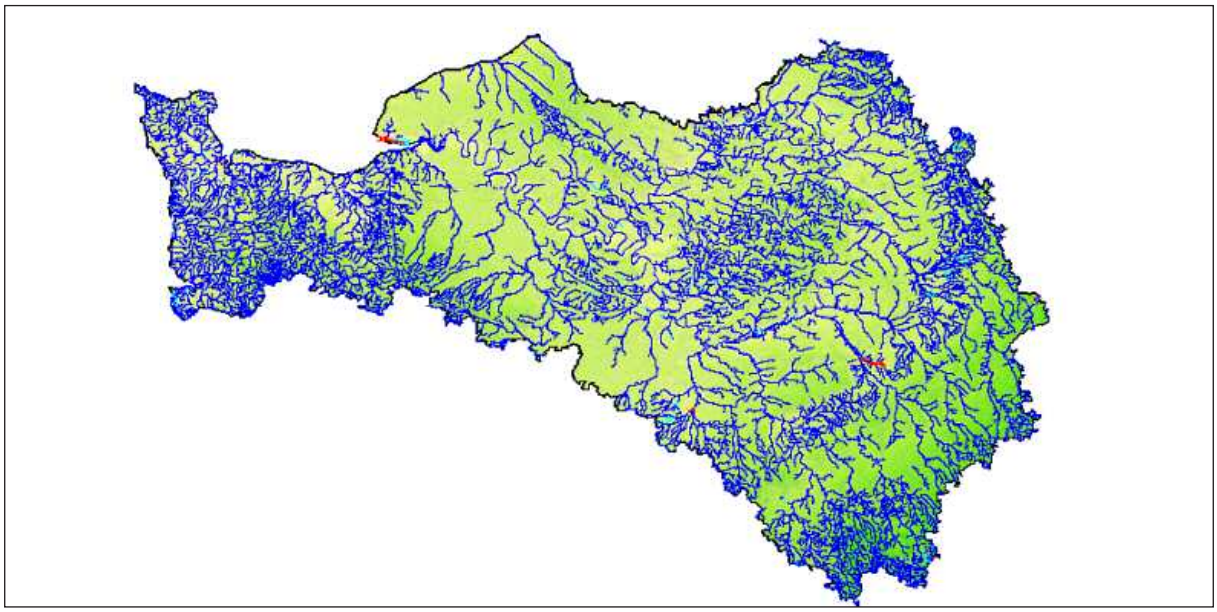


Figure 1 : Réseau hydrologique extrait de BD Carthage IGN©

partir du modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 50m. Si ce dernier est précis, il reste des dépressions pour lesquelles aucun exutoire n'est possible ou des zones planes pour lesquelles la détermination d'un talweg s'avère impossible et il est nécessaire de traiter ces zones afin de rétablir l'écoulement potentiel. Pour les zones en dépression, l'hypothèse suivante guide les corrections, *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*. Une première technique de traitement suppose que ces dépressions résultent d'artéfacts ne représentant aucune forme réelle (Janson et Domingue, 1998). De ce fait, il suffit de procéder à leur comblement après en avoir déterminé l'exutoire : c'est la technique dite du « bouche-trous ». Une seconde technique (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 celui-ci en rétablissant la continuité du réseau. Enfin, une dernière méthode 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 s'écoule en aval.

A l'usage, ces techniques offrent toutes des résultats comparables. L'algorithme de traitement des dépressions n'influence pas de manière significative le réseau obtenu par extraction automatique, en revanche, c'est au niveau des modifications du MNT que se situent les différences essentielles, en effet, si la seconde technique indiquée est sans effet sur les altitudes, les deux autres vont modifier le MNT et fournir une indication quant à la qualité des données initiales et/ou la nature des reliefs observés (dolines, zones endoréiques, etc…). Par souci de simplification des outils mis en œuvre, la première méthode est celle retenue pour le processus de calcul de l'IDPR.

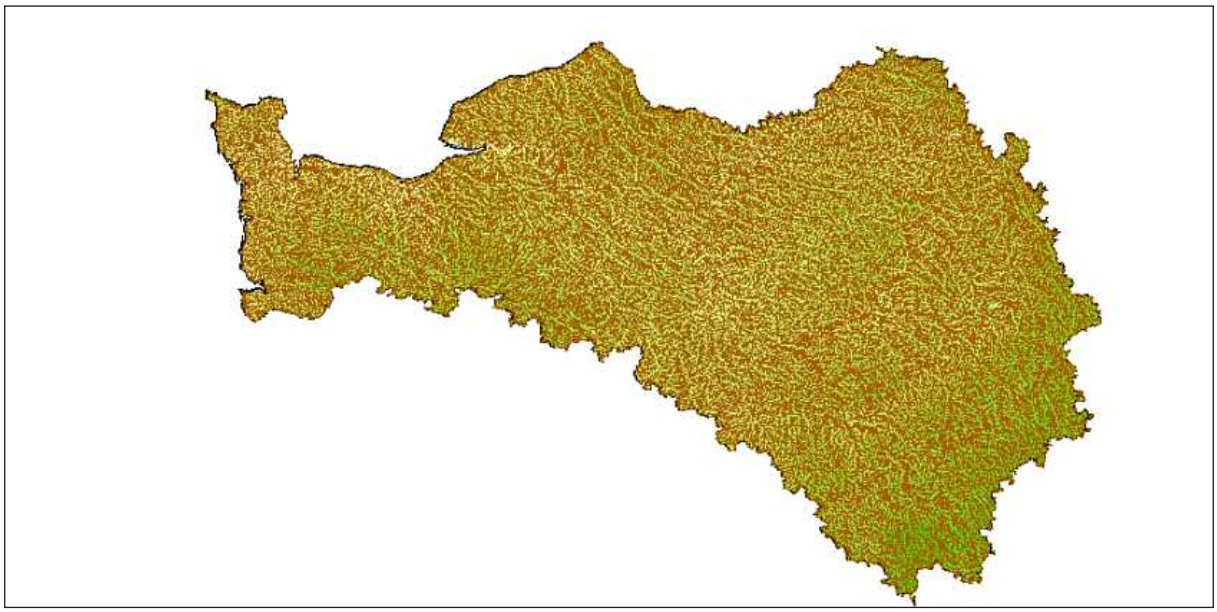


Figure 2 - Réseau des talwegs

Calcul de l'IDPR

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.
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. Un IDPR voisin ou égal à 2000 traduit 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'infiltre pas. Si la nappe est profonde, le caractère ruisselant peut démontrer une imperméabilité des terrains naturels. On pose l'hypothèse que des valeurs d'IDPR supérieures à 2000 sont majoritairement assimilables à des milieux humides.

La figure 3 présente le résultat du calcul de l'indice IDPR sur la totalité du territoire Seine-Normandie, le maillage est composé de cellules de 100m de coté. Il est établit sur la seule analyse des données géomorphologiques et hydrologiques et la comparaison avec la carte géologique présentée en médaillon montre des correspondances remarquables. Deux exemples ont vocation à illustrer ces correspondances entre les résultats de l'IDPR et formations géologique.

Le calcaire de Beauce

La nappe de Beauce que représente le complexe aquifère des calcaires de Beauce constitue

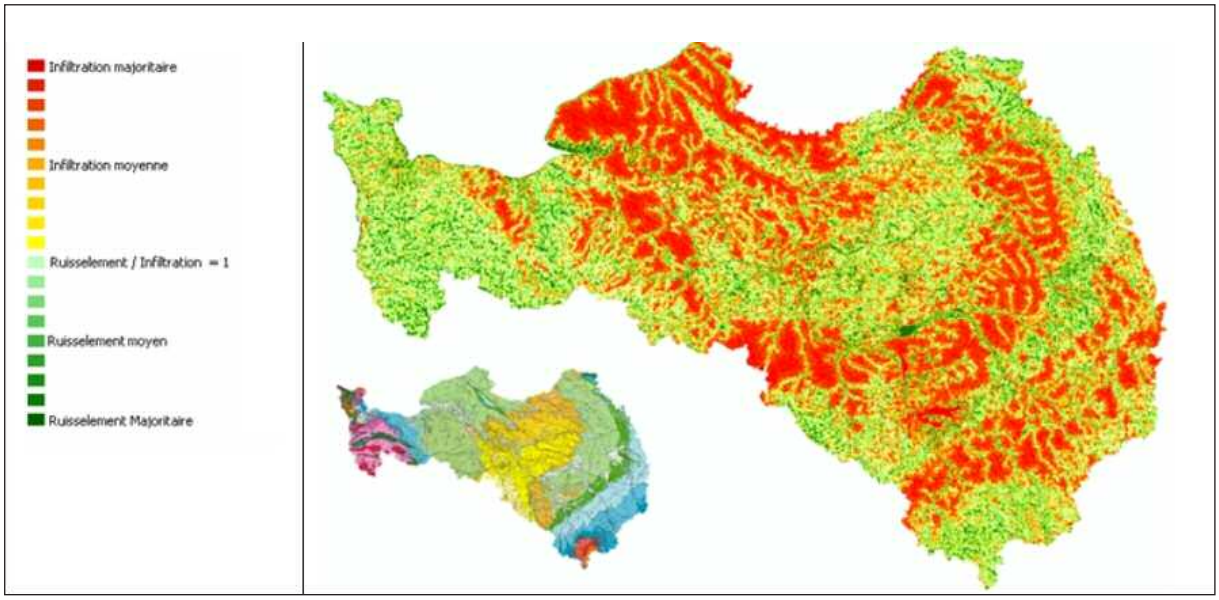


Figure 3 : Grille IDPR appliquée au bassin Seine-Normandie

une unité hydrographique qui s'étend entre la Seine et la Loire. Représentée par la nappe libre des calcaires de Beauce et sa partie captive sous forêt d'Orléans et recouvrement du Burdigalien, le réservoir aquifère est composé principalement de calcaires empilés dans une cuvette dont le fond est constitué d'argile imperméable. Dans le secteur de la forêt d'Orléans, la nappe est captive, surmontée d'une couche d'argile. La carte géologique à l'échelle du million qui est stratigraphique et non lithologique, ne montre pas (fig. 4) ce recouvrement des formations de la forêt orléanaise alors que la grille IDPR la met clairement en évidence.

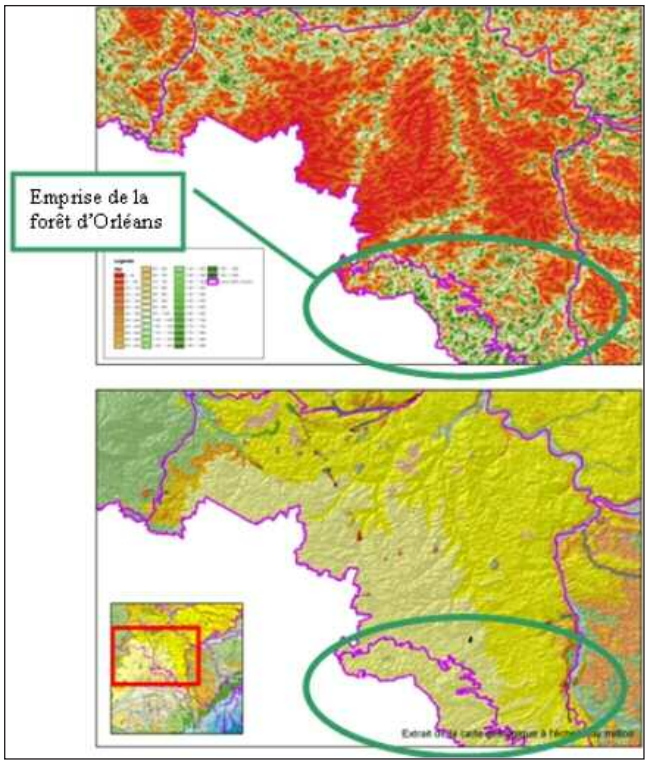


Figure 4 : La Beauce, réponse IDPR et géologie (Million BRGM)

Le pays de Bray

La partie nord du Bassin sédimentaire de Paris est majoritairement composée des affleurements de l'auréole du Crétacé supérieur, sous un faciès de craie largement développé sur les territoires de la Somme, du nord de l'Aisne et de l'ouest de l'Oise. Localement existent des affleurements tertiaires (sables et argiles Eocène principalement) déposés sur le substrat crayeux.Plus localement encore, des terrains plus anciens d'âge Jurassique affleurent en limite de région, dans le Beauvaisis, à la faveur de la « boutonnière » du Pays de Bray. Ces terrains sont formés par des argiles ou des marnes calcaires relativement imperméables. Le bloc diagramme (fig.5) et la coupe associée en illustrent la morphologie et la structure géologique.

La grille de calcul de l'IDPR fournit pour cette région une réponse très détaillée où la présence des formations peu perméables du Crétacé inférieur souligne la structure de l'anticlinal du pays de Bray qui a formé cette boutonnière si particulière.

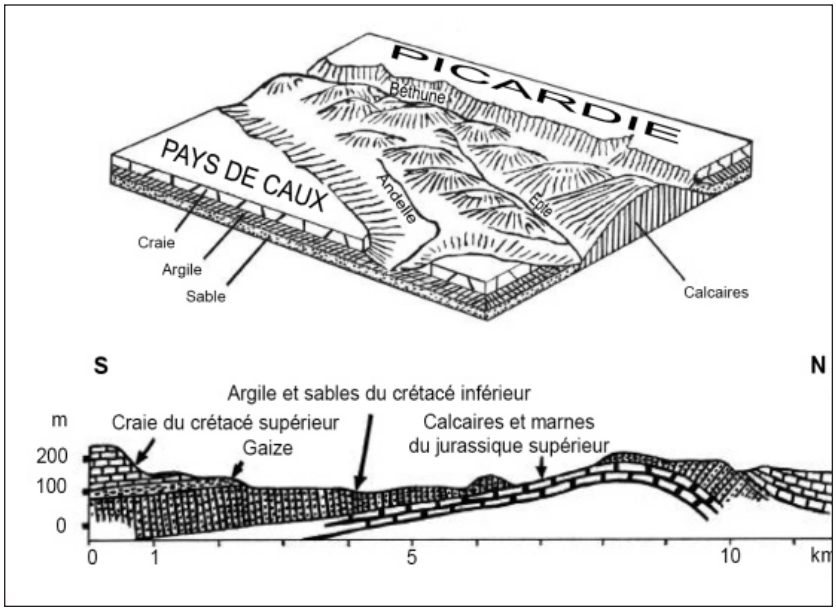


Figure 5 : Le Pays de Bray

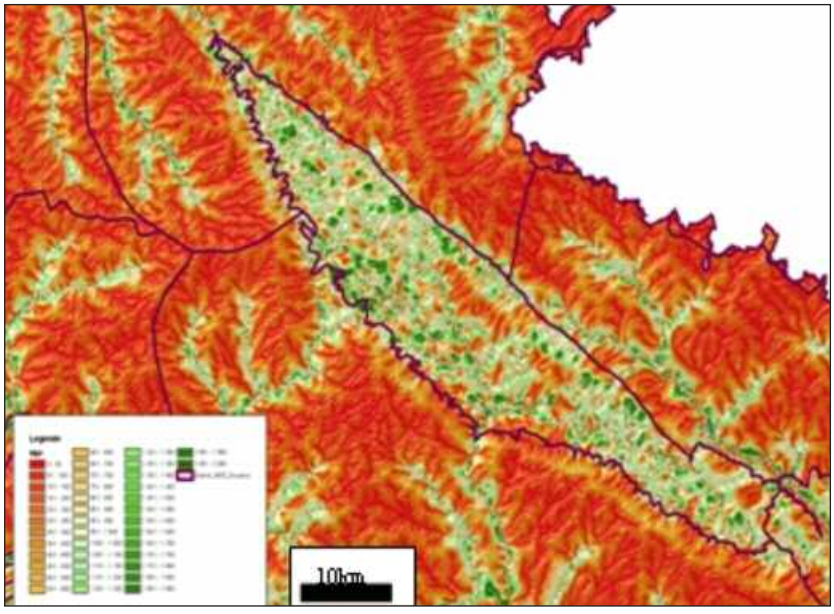


Figure 6 : réponse IDPR du pays de Bray

Cartographie de l'indice simplifié de vulnérabilité

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions. La vulnérabilité est alors représentée par la capacité donnée à l'eau située en surface de rejoindre le milieu souterrain saturé en eau. Deux types de vulnérabilité sont distinguées; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Schnebelen et al., 2002). La vulnérabilité intrinsèque est définie pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. La vulnérabilité spécifique est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

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). Parmi celles-ci, les méthodes dites « de cartographie à index avec pondération des critères » (Point Count Systems Models, PCSM) apparaissent les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et

Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994). Ces méthodes supposent l'identification de nombreux indices auxquels l'IDPR a vocation, a petite échelle, à se substituer. Ainsi l'étude présentée s'attache à réaliser la carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée du bassin Seine-Normandie, simplifiée car elle exploite uniquement deux critères:

- la zone non saturée (ZNS) qui intervient avant l'arrivée du polluant dans l'aquifère (nature, perméabilité, épaisseur), elle est issue de la compilation des données piézométriques des premières nappes rencontrées et du MNT exploité pour l'IDPR;
- L'IDPR, exploité pour se substituer aux données liées à la perméabilité des sols et les caractéristiques propres des aquifères. Il s'agit d'une approximation des caractéristiques de ces milieux pour lesquels, on l'a vu précédemment, l'IDPR décrit, de manière qualitative, la perméabilité à travers les pôles infiltration et ruissellement.

La formule de calcul est : Vi = (Poids IDPR * [Critère IDPR]) + (Poids ZNS * [Critère ZNS]) avec : Poids IDPR + Poids ZNS = 1 et V_i compris entre 0 et 100. L'ajustement des poids retenu par les différents experts régionaux comme le plus représentatif des connaissances acquises est fixé à 50%/50%.

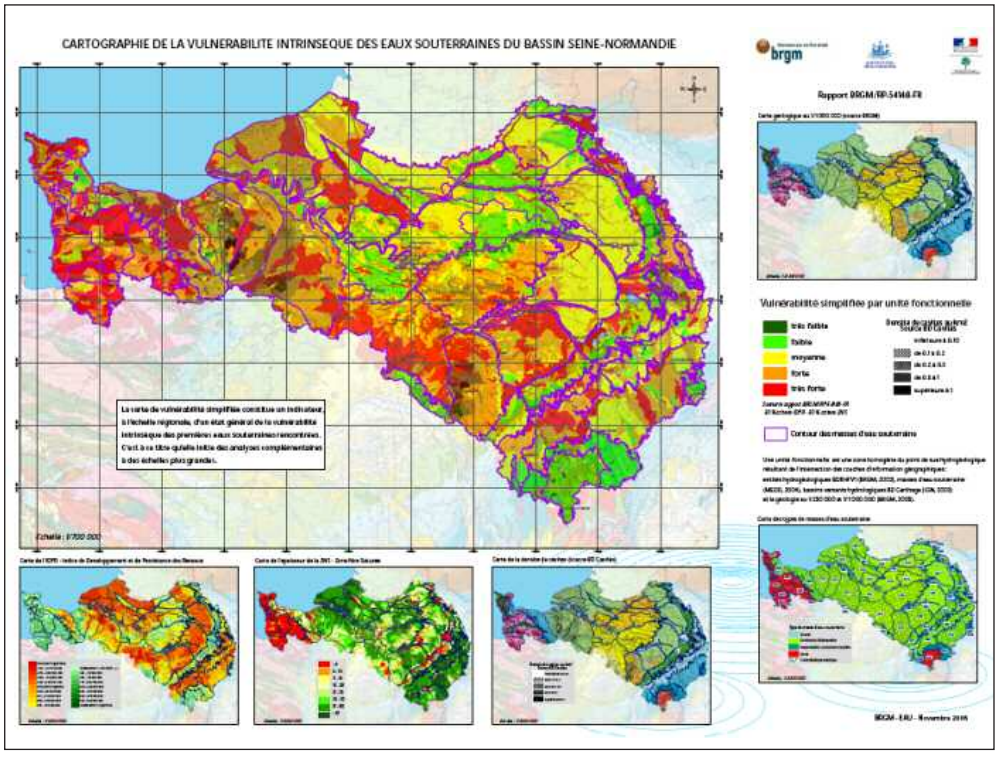


Figure 7 : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque du bassin Seine- Normandie

Confrontation de la méthode IDPR/ZNS avec les cartes de vulnérabilité régionales antérieures

La cartographie du bassin Seine-Normandie a été discutée et 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. Parmi les différentes zones de contrôle prises en compte lors de l'étude, sont illustrés à la suite les résultats comparés des cartes régionales sur les territoires de Bourgogne et de Champagne.

En Champagne-Ardenne, le document de référence utilisé est la carte de vulnérabilité spéci-

fique vis à vis des nitrates de la zone d'affleurement du faciès crayeux du Turonien supérieur et du Sénonien, Crétacé Supérieur. La méthode élaborée par J. Ricour (1998) dans le cadre d'une application à la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais) a été utilisée et adaptée pour l'élaboration de cette carte. Le degré de vulnérabilité est exprimé selon 4 classes (Vulnérabilité négligeable à nulle, Vulnérabilité faible, Vulnérabilité modérée et Vulnérabilité forte) représentées sur carte par un gradient de couleur (cf. légende). Le résultat du test de calage de la méthode d'analyse simplifiée de la vulnérabilité de l'aquifère de la craie est la carte présentée en figure 8. Sa comparaison avec la carte de référence indique un calage adéquat sur cette région

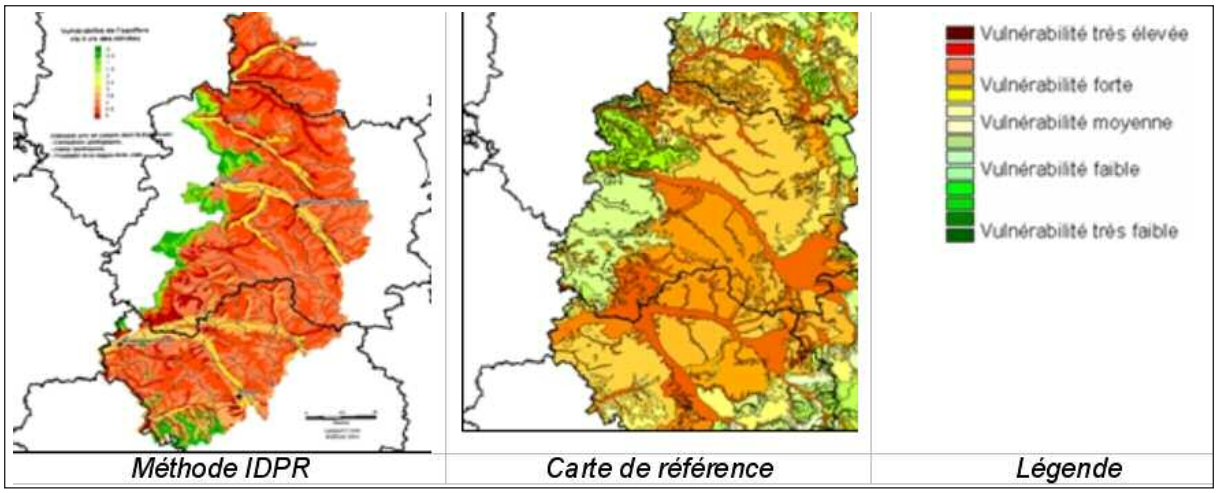


Figure 8 : Comparaison des méthodes sur la région Champagne- Ardennes.

En Bourgogne, la carte de référence utilisée est la carte de vulnérabilité aux phytosanitaires des eaux. La comparaison est présentée en figure 9 et montre une nette correspondance concernant le degré de vulnérabilité affecté aux aquifères par la méthode simplifiée à l'aide de l'IDPR.

Exemple d'application de la carte de vulnérabilité intrinsèque aux sites BASOL

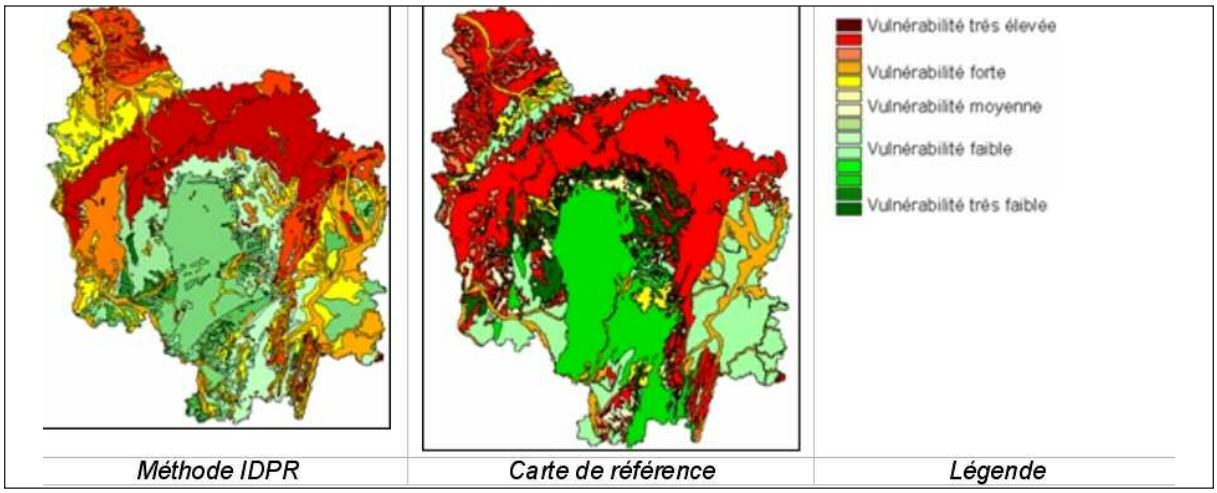


Figure 9 : Comparaison des méthodes sur la région Bourgogne.

L'Agence de l'Eau Seine- Normandie et le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable ont chargé le BRGM en 2004 de développer des indicateurs d'appréciation de la vulnérabilité des eaux souterraines au droit des sites BASOL sur l'ensemble du bassin. Une méthodologie de croisement des données en fonction de différents critères pertinents a d'abord été mise au point avec les partenaires de l'étude. Une Geodatabase et un Sytème d'Information Géographique au format Access 2000® et Arcmap® ont ensuite été élaborés. L'outil ainsi mis en place nommé « BASOLHYD SN 2005 » couplé au SIG peut permettre de prioriser les actions de traitement et de surveillance des sites BASOL, mais aussi de tout autre point de pression ponctuelle. Les critères permettant de classer et comparer les sites entre eux combinent les paramètres sur les sources de pollutions (données de BASOL), les facteurs de transfert vers les nappes (obtenus par le SIG vulnérabilité) et les cibles potentielles (captages AEP, volumes prélevés, enjeux de protection des masses d'eau). Le SIG relié à l'outil numérique BASOLHYD permet d'analyser différents scénarios multicritères par modulation des poids affectés à chaque critère (IDPR, ZNS, source, transfert, cible), de générer des cartes de visualisation des résultats (atlas du bassin par masses d'eau, départements et régions et des sites BASOL) et des tableaux de résultats triés par catégories de sites.
Sur un total de 846 sites BASOL géoréférencés du bassin ayant pu faire l'objet du traitement multicritères, 35% sont localisés au droit de formations aquifères de forte vulnérabilité et 47% au droit de formations aquifères de vulnérabilité moyenne. Parmi les 281 sites considérés comme prioritaires, 256 ont mis en place une surveillance des eaux souterraines et 222 ont engagé des actions de traitement des sites. La figure 10 présente à titre d'exemple la carte des sites BASOL de la région Picardie.

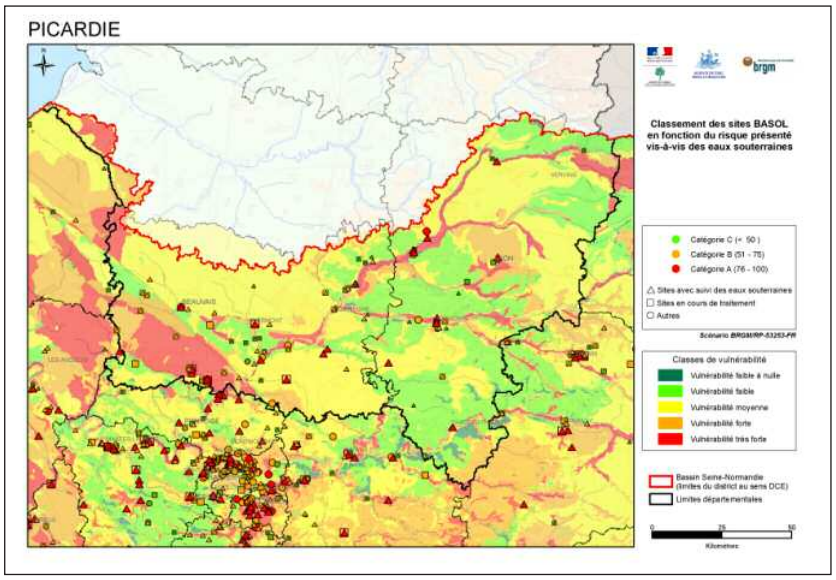


Figure 10 : Analyse de la vulnérabilité des sites BASOL de la région Picardie

Conclusion

La transition de l'IDPR vers la notion de vulnérabilité se fait avec l'exploitation du critère lié à l'épaisseur de la ZNS. Ce critère permet de hiérarchiser la cible eau souterraine selon la distance à parcourir depuis la surface des terrains naturels jusqu'au milieu saturé. Dans le domaine sédimentaire, le critère lié à l'épaisseur de la zone non saturée conditionne à part égale avec l'IDPR l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines. Ce dernier permettant de simplifier drastiquement le jeu de données nécessaire à l'élaboration de ces cartes.

L'avancement des différentes études menées sur le territoire national permet d'espérer une couverture nationale de la vulnérabilité des eaux souterraines à l'horizon de l'année 2007 (fig.11).
Une telle couverture a déjà été menée en sur la totalité d'un territoire national, en Slovénie (Mardhel et al., 2004).

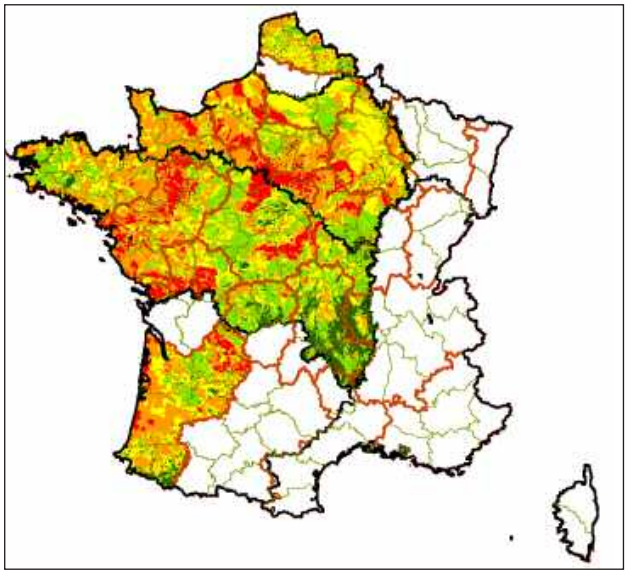


Figure 11 : Avancement des différentes études sur le territoire national.

La limite d'interprétation, d'exploitation, de ces cartes de vulnérabilité est fixée par la méthode d'élaboration des données qui la composent. Par construction, on peut considérer une échelle minimum de 1/100 000 lorsque l'on dispose d'un fond hydrologique vectorisé à la même échelle et d'un modèle numérique de terrain au pas de 50m. L'analyse de ces réseaux à partir du modèle numérique de terrain au pas de 90m (SRTM 90m) présente un résultat comparable et permet d'envisager une cartographie européenne de cette indice (projet FOOTPRINT).

L'application aux sites BASOL réalisée sur le bassin Seine- Normandie a montré l'intérêt de telles cartes pour aider à l'établissement des priorités d'interventions et de surveillance. Les autres perspectives d'utilisation sont nombreuses. Parmi celles-ci, on retiendra :

- L'extension de la méthode aux sites BASOL de l'ensemble du territoire ;
- L'exploitation de l'IDPR dans le cadre d'études de vulnérabilité des eaux superficielles à l'échelle de bassins versants ;
- La cartographie à une échelle plus locale de la vulnérabilité associée à une carte de sensibilité dans les zones à enjeux ;
- L'établissement des priorités de bancarisation des données du suivi de la qualité eaux souterraines en aval des Installations Classées (I.C) ;
- La contribution à la sélection des I.C nécessitant une surveillance des eaux souterraines localisées dans les secteurs les plus vulnérables (article 65 b du décret relatif à la surveillance du 03/08/2001) ;
- L'aide à l'adaptation des réseaux de suivi liés au SDDE et à la mise en place d'une surveillance commune des eaux pour un ensemble de sites industriels situés au droit d'une zone très vulnérable.

SRTM 90m: Void-filled seamless SRTM data V2, 2005, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database

FOOTPRINT was published in the Official Journal of the European Communities on 30 October 2004. It's a STREP (Specific Targeted Research Project). FOOTPRINT Creating tools for pesticide risk assessment and management in Europe

Références :

- 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 Dgital Elevation Models. Water ressources 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.
- 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. et Gravier A., 2005 - Carte de vulnérabilité simplifiée du bassin Seine-Normandie. Rapport BRGM/RP- 54148-FR
- Mardhel V. , Frantar P., Uhan J., Mi?o 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.
- 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.
- 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.