

Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté

Rapport « final »

BRGM/RP-53576-FR

Décembre 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2003 - PSP03FRC09

N.Dörfliger, D. Jauffret, S. Loubier

Avec la collaboration de

V. Petit

Vérificateur :

Nom : Petit Vincent

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : Lachassagne Patrick

Date :

Signature :



Mots clés : vulnérabilité, aquifères karstiques, Franche-Comté, méthode multicritère, périmètres de protection

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

Dörfliger N., Jauffret D., Loubier S. (2004) : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté, avec la collaboration de V. Petit, rapport BRGM RP-53576–FR, 129 pages, 47 illustrations, 4 annexes.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les eaux souterraines des systèmes karstiques de Franche-Comté représentent des ressources importantes pour l'approvisionnement en eau. L'eau joue un rôle important tant pour l'agriculture, que pour le développement économique -industrie et tourisme-

Les systèmes karstiques sont considérés comme vulnérables aux pollutions par comparaison avec les hydrosystèmes des autres milieux, notamment ceux à porosité d'interstices. Cette sensibilité particulière aux pollutions est à mettre en relation directe avec la structure fortement hétérogène des aquifères karstiques et son fonctionnement. Les processus de filtration ou d'auto-épuration des polluants n'ont pas le temps de se développer au sein de l'aquifère notamment à cause du temps de séjour de l'eau trop court. Ainsi, les systèmes karstiques requièrent un plan de protection spécifique adapté à ses caractéristiques de structure et de fonctionnement.

Face aux problèmes récurrents auxquels sont confrontés les bureaux d'étude et les hydrogéologues agréés pour élaborer les documents de base afin de délimiter des périmètres de protection pertinents et applicables en milieu karstique, la DIREN de Franche-Comté est à l'initiative de cette étude menée par le BRGM dans le cadre de ses actions de Service Public « PSP03EAUFRC09 ». La DIREN FRC a demandé au BRGM de rédiger un guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages en milieu karstique de la région Franche-Comté, sur la base de deux exemples d'application.

La démarche méthodologique suivante a été appliquée : (i) analyse des problèmes rencontrés lors de la délimitation des périmètres de protection en milieu karstique à partir d'une dizaine de cas en Franche-Comté, (ii) méthodologie de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à partir d'une revue bibliographique, la méthode RISK est proposée, (iii) application de la méthode RISK sur deux bassins d'alimentation de dimension contrastée (source Arcier et source du Crépôt à Uzelle), et (iv) évaluation économique de la mise en place des périmètres de protection, proposition d'une méthodologie et application aux périmètres de protection de la source d'Arcier et (v) rédaction d'un guide méthodologique.

La méthode RISK proposée est une méthode multicritère à index de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques ; elle tient compte de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques en considérant 4 critères : (i) R pour la roche aquifère, (ii) I pour les conditions d'infiltration (diffuse, ponctuelle, en fonction des objets morphologiques et des pentes), (iii) S pour le sol et la couverture protectrice et (iv) K pour le degré de karstification. Chaque critère comprend 5 classes définies. Les 4 critères sont affectés d'un indice de pondération ; l'addition de l'ensemble des cartes permet d'obtenir par analyse multicritère une carte de vulnérabilité comprenant 5 classes, de 0 à 4, du moins au plus vulnérables.

La méthodologie a été appliquée aux bassins d'alimentation de la source d'Arcier (>100 km²) et de la source du Crépôt à Uzelle (< 5 km²). Le bassin de la source d'Arcier est globalement d'une vulnérabilité forte à très forte, avec notamment le bassin versant du Creux Sous Roche, au niveau du marais de Saône. Les zones de vulnérabilité moyenne à faible sont situées dans des zones de pentes avec une couverture protectrice. Des zones de vulnérabilité différentes peuvent ainsi être spatialisées et servir d'éléments pour la délimitation des périmètres de protection. Le bassin d'alimentation de la source du Crépôt à Uzelle est quant à lui caractérisé par une vulnérabilité globale moyenne, la vulnérabilité plus forte correspondant notamment à une doline, ou au résultat de la combinaison entre faible pente et faible couverture protectrice.

L'évaluation économique de la mise en œuvre des périmètres de protection pour la source d'Arcier a été menée selon l'approche suivante : (i) établissement de la matrice des prescriptions pour les différents périmètres de protection, (ii) identification et évaluation des coûts associés à chaque prescription, les coûts actuels d'un coût ponctuel étant déterminés en considérant un taux d'actualisation en fonction de la date t d'occurrence, (iii) agrégation des coûts. Le coût total de la mise en œuvre du périmètre de protection de la source d'Arcier peut ainsi être compris entre 3,9 M€ dans l'hypothèse basse et 6,1 M€ pour l'hypothèse haute. Ces coûts calculés fixent des ordres de grandeur même si toutes les informations pour évaluer les coûts n'étaient pas disponibles ; ils sont relativement faibles au regard du coût total de la distribution de la ressource. L'approche utilisée pourrait être appliquée dans le cadre de la délimitation des périmètres de protection comme outil d'aide à la décision en fonction d'arguments d'ordre économique liée aux contraintes des périmètres de protection.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction..... | 11 |
| 1.1. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE | 12 |
| 2. Analyse des problèmes rencontrés lors de la délimitation des périmètres de protection en domaine karstique | 15 |
| 2.1. RAPPEL DE L'INTERET DES PÉRIMÈTRES DE PROTECTION ET DES MISSIONS DE L'HYDROGEOLOGUE AGREE | 15 |
| 2.2. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE MISE EN OEUVRE | 16 |
| 2.3. ANALYSE DES DOSSIERS | 17 |
| 2.4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES | 31 |
| 3. Méthode de cartographie et guide méthodologique..... | 33 |
| 3.1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE | 33 |
| 3.2. MÉTHODE RISKE | 46 |
| 3.3. QUELS CRITÈRES RETENIR ? | 50 |
| 3.4. RISK : UNE MÉTHODE MUTLICRITÈRE | 52 |
| 3.4.1. Introduction..... | 52 |
| 3.4.2. Principe de la méthode..... | 52 |
| 3.4.3. Caractérisation des critères..... | 53 |
| 3.5. INDICE GLOBAL DE VULNÉRABILITÉ | 60 |
| 3.6. IDENTIFICATION DES CLASSES DE VULNÉRABILITÉ | 62 |

| | |
|--|-----------|
| 4. Evaluation du risque | 63 |
| 5. Application de la méthode aux systèmes karstiques d’Arcier et d’Uzelle | 65 |
| 5.1. INTRODUCTION | 65 |
| 5.2. PROCÉDURES DE TRAITEMENT DES DONNÉES..... | 65 |
| 5.2.1. Démarche générale | 66 |
| 5.2.2. Traitement du Modèle Numérique de Terrain (MNT)..... | 67 |
| 5.3. CAS D’ÉTUDE – SYSTÈME KARSTIQUE DE LA SOURCE D’ARCIER | 67 |
| 5.3.1. Contexte géologique et hydrogéologique | 67 |
| 5.3.2. Structure géologique..... | 69 |
| 5.3.3. Hydrogéologie..... | 71 |
| 5.3.4. Caractérisation des critères | 76 |
| 5.3.5. Carte de vulnérabilité | 84 |
| 5.3.6. Commentaires généraux..... | 85 |
| 5.4. CAS D’ÉTUDE – SYSTÈME KARSTIQUE DE LA SOURCE D’UZELLE | 86 |
| 5.4.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique | 86 |
| 5.4.2. Structure géologique..... | 86 |
| 5.4.3. Hydrogéologie..... | 86 |
| 5.4.4. Caractérisation des critères | 88 |
| 5.4.5. Carte de vulnérabilité | 91 |
| 5.4.6. Commentaires généraux..... | 93 |
| 6. Evaluation économique de la mise en œuvre du périmètre de protection de la source d’Arcier | 95 |
| 6.1. INTRODUCTION | 95 |
| 6.2. ÉLÉMENTS DE DÉFINITION | 95 |

| | |
|---|------------|
| 6.2.1. Rappel généraux..... | 95 |
| 6.2.2. Typologie des coûts | 96 |
| 6.3. APPLICATION..... | 99 |
| 6.3.1. Phase 1 : Construction de la matrice des prescriptions | 99 |
| 6.3.2. Phase 2 : Identification et évaluation des coûts associés à la matrice des prescriptions | 102 |
| 6.3.3. Phase 3 : Identification et évaluation de coûts non directement liés aux prescriptions | 109 |
| 6.3.4. Phase 4 : Agrégation des coûts | 110 |
| 6.4. CONCLUSION..... | 110 |
| 7. Guide méthodologique..... | 111 |
| 8. Perspectives et conclusion..... | 113 |
| 9. Bibliographie..... | 115 |

Liste des illustrations

| | |
|--|----|
| Illustration 1 – Organigramme de la démarche méthodologique de l'étude « Vulnérabilité des aquifères karstiques »..... | 13 |
| Illustration 2 - Dénomination des dossiers étudiés. | 17 |
| Illustration 3 - Analyse des dossiers de protection des captages en milieu karstique..... | 21 |
| Illustration 4 - Bilan des études réalisées dans les dossiers analysés. | 23 |
| Illustration 5 : Détermination du critère P de la méthode PI , d'après la méthode d'Höltling (1995). | 39 |
| Illustration 6 - Classes de vulnérabilité de la méthode PI. | 40 |
| Illustration 7 - Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST 620). | 41 |
| Illustration 8 - Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif (COST 620)..... | 41 |
| Illustration 9 - Indice "COP" utilisé pour la cartographie de la vulnérabilité (Vias et al., 2002). | 42 |
| Illustration 10 - Composés du Flux pour déterminer l'indice C selon le scénario A, $C = (dh)*(ds)*(sv)$ (Vias et al., 2002)..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Illustration 11 - Composés du flux pour déterminer l'indice C pour le scénario B, C = (sf) * (sv) (Vias et al., 2002)..... | 43 |
| Illustration 12 - Indice d' O _s (Vias et al., 2002)..... | 43 |
| Illustration 13 - Indice pour O _L (Vias et al., 2002)..... | 44 |
| Illustration 14 - Diagramme explicatif de la méthode RISKE (Pételet et al., 2001)..... | 47 |
| Illustration 15 - Classification des différents critères de la méthode RISKE (Pételet et al. 2001)..... | 48 |
| Illustration 16 - Caractéristiques du critère R "roche aquifère"..... | 54 |
| Illustration 17 - Caractéristiques du critère I « conditions d'infiltration »..... | 55 |
| Illustration 18 - Triangle de la répartition des textures pour la classification des sols..... | 57 |
| Illustration 19 - Matrice de détermination du paramètre nature du sol..... | 57 |
| Illustration 20 - Caractéristiques du sol (Petelet et al., 2001)..... | 58 |
| Illustration 21 - Définition des classes du critère K « développement de la karstification »..... | 60 |
| Illustration 22 - Situation géographique du bassin d'alimentation de la source d'Arcier (25) (© IGN)..... | 68 |
| Illustration 23 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000 (édition brgm) au niveau du bassin d'alimentation de la source d'Arcier..... | 71 |
| Illustration 24 - Coupes géologiques transverses au bassin d'alimentation de la source d'Arcier (d'après Dreyfuss et Chave, 1971) (JM: Jurassique moyen, JS: Jurassique supérieur, Oxf: Oxfordien)..... | 71 |
| Illustration 25 - Répartition des dolines et zones de dolines à l'échelle du bassin d'alimentation de la source d'Arcier..... | 72 |
| Illustration 26 - Bassins versants de surface sur le bassin d'alimentation de la source d'Arcier..... | 74 |
| Illustration 27 - Fonctionnement hydrogéologique du bassin d'alimentation de la source d'Arcier (d'après Mettetal, DIREN SRAE, 1985)..... | 75 |
| Illustration 28 - Carte du critère R pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier..... | 77 |
| Illustration 29 - Modèle numérique de terrain du bassin d'alimentation de la source d'Arcier..... | 78 |
| Illustration 30 - Carte du critère I du bassin d'alimentation de la source d'Arcier..... | 78 |
| Illustration 31 - Classification des sols selon la méthode RISK à partir des données pédologiques de l'étude réalisée sur la caractérisation des sols et du ruissellement par le GRAP en 2003 pour les sols de type 1 à 5..... | 80 |
| Illustration 32 - Classification des sols selon la méthode RISK à partir des données pédologiques de l'étude réalisée sur la caractérisation des sols et du ruissellement par le GRAP en 2003 pour les sols de type K à 8..... | 80 |
| Illustration 33 - Carte de répartition des sols à partir de l'étude du GRAP (2003)..... | 81 |
| Illustration 34 - Carte du critère S pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier..... | 82 |
| Illustration 35 - Carte du critère K pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier..... | 83 |

| | |
|---|-----|
| Illustration 36 - Carte du critère E utilisée pour test dans le passage de la méthode RISKE à RISK, pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier. | 84 |
| Illustration 37 - Schéma structural 1: coupe W-E passant à quelques 800 m au N de la source Crépôt..... | 87 |
| Illustration 38 - Schéma structural 2: coupe NS passant par la source de Crépôt à Uzelle..... | 87 |
| Illustration 39 - Carte du critère K à l'échelle du bassin d'alimentation de la source du Crépôt d'Uzelle. | 88 |
| Illustration 40 - Carte du critère K pour le bassin d'alimentation de la source du Crépôt à Uzelle..... | 89 |
| Illustration 41 - Carte du critère I du bassin d'alimentation de la source du Crépôt à Uzelle..... | 90 |
| Illustration 42 - Carte du critère S pour le bassin d'alimentation de la source de Crépôt d'Uzelle..... | 91 |
| Illustration 43 - Carte de la vulnérabilité globale pour le bassin d'alimentation de la source du Crépôt d'Uzelle selon la méthode RISK..... | 92 |
| Illustration 44 - Carte de la vulnérabilité pour la méthode RISKE..... | 92 |
| Illustration 45 - Type d'acteur et type de valeur (source : (Garrabé 1994))..... | 96 |
| Illustration 46 - Matrice des prescriptions. | 102 |
| Illustration 47 - Matrice des coûts associés aux prescriptions..... | 103 |

Liste des annexes

| | |
|--|-----|
| Annexe 1 Carte des critères de vulnérabilité pour Arcier | 119 |
| Annexe 2 Carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation de la source d'Arcier | 125 |
| Annexe 3 Liste des personnes contactées dans le cadre de l'analyse économique..... | 125 |
| Annexe 4 Guide méthodologique au format pdf (CD-Rom)..... | 129 |

1. Introduction

Les eaux souterraines des systèmes karstiques de Franche-Comté représentent des ressources importantes pour l'approvisionnement en eau. L'eau joue un rôle important tant pour l'agriculture, que pour le développement économique -industrie et tourisme-.

Les systèmes karstiques sont considérés comme vulnérables aux pollutions par comparaison avec les hydrosytèmes des autres milieux, notamment ceux à porosité d'interstices. Cette sensibilité particulière aux pollutions est à mettre en relation directe avec la structure fortement hétérogène des aquifères karstiques, avec une alimentation de surface diffuse ou ponctuelle donc concentrée et des perméabilités très élevées dans des conduits souterrains (transmissifs) et des perméabilités plus faibles dans les blocs peu perméables (capacitifs). Cette dualité se manifeste par un comportement hydraulique caractéristique : crues rapides et violentes et étiage à débit souvent soutenu. Les processus de filtration ou d'auto-épuration des polluants n'ont pas le temps de se développer au sein de l'aquifère notamment à cause du temps de séjour de l'eau trop court. La vulnérabilité des aquifères karstiques présente en contre partie certaines caractéristiques intéressantes : des systèmes karstiques possédant des réserves importantes peuvent fournir une eau de bonne qualité en étiage, les pollutions accidentelles sont généralement éliminées rapidement (pas d'effet durable). Ainsi, les systèmes karstiques requièrent un plan de protection spécifique adapté à ses caractéristiques de structure et de fonctionnement.

Il n'est pas rare que les dossiers de périmètres de protection en milieu karstique en raison de la dimension inadéquate des surfaces des différents périmètres, soient très souvent lourds à gérer et aient du mal à aboutir. La totalité de la surface du bassin d'alimentation de la source captée à protéger peut se retrouver classer en périmètre de protection rapprochée; ce type de situation entraîne des difficultés insurmontables lors de la mise en vigueur des périmètres: inscription aux hypothèques des contraintes des parcelles, impossibilité d'un syndicat ou collectivité de dédommager financièrement les propriétaires pour ces contraintes.

Face aux problèmes récurrents auxquels sont confrontés les bureaux d'étude et les hydrogéologues agréés pour élaborer les documents de base et pour délimiter des périmètres de protection pertinents et applicables en milieu karstique, la DIREN de Franche-Comté est à l'initiative de cette étude menée par le BRGM dans le cadre de ses actions de Service Public « PSP03EAUFR09 » a demandé au BRGM de rédiger un guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages en milieu karstique de la région Franche-Comté, sur la base de deux exemples d'application.

Ce guide méthodologique s'adresse aux hydrogéologues praticiens des bureaux d'étude et aux hydrogéologues agréés. Il doit ainsi fournir des éléments pour l'établissement de cartes de vulnérabilité afin de préparer les documents nécessaires à

la délimitation des périmètres de protection. Ce guide est illustré par une application de la méthodologie sur deux sites.

1.1. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

La démarche retenue dans le cadre de cette étude s'articule autour de 5 tâches principales. Ces différentes tâches s'organisent selon une certaine chronologie et sont reliées les unes aux autres comme le montre l'organigramme de la figure 1 :

- ① La première tâche se rapporte à une analyse des problèmes rencontrés lors de la délimitation des périmètres de protection en contexte karstique :
 - (i) établir la liste des problèmes rencontrés lors de la délimitation des périmètres de protections en contexte karstique
 - (ii) évaluer les approches utilisées pour délimiter les périmètres de protection en contexte karstique. à partir de la consultation d'une sélection de rapports d'études préalables et de rapports d'hydrogéologues agréés pour des captages AEP en contexte karstique.
- ② La deuxième tâche consiste à partir de la bibliographie, de guides existants, notamment en Suisse (OFEFP, méthode EPIK), de proposer une méthodologie pour la cartographie de la vulnérabilité des bassins d'alimentation des captages en milieu karstique et la délimitation des périmètres de protection. Cette méthode multicritère tiendra compte des récents développements et réflexions au niveau européen (Action COST 620¹) ; les critères retenus doivent être indépendants, pertinents et faciles à déterminer. Un guide méthodologique simple et concis sera rédigé.
- ③ La troisième tâche consiste à tester la faisabilité de la méthode sur deux sites en critiquant les résultats et mesurant l'importance de la mise en œuvre des études. Deux bassins seront caractérisés, à savoir le bassin de la source d'Arcier et un bassin de plus petite dimension.
- ④ La quatrième tâche se rapporte à l'évaluation de l'impact socio-économique des servitudes des périmètres de protection, avec une application au bassin d'alimentation de la source d'Arcier. Il s'agit de proposer une méthode d'évaluation de l'impact socio-économique des servitudes associées aux périmètres de protection d'une source, afin de permettre aux décideurs d'estimer le coût du projet ses conséquences socio-politiques au niveau local et leur intégration dans les POS, plan d'urbanisme et projets d'aménagement.
- ⑤ La cinquième tâche consiste à rédiger un guide méthodologique.

¹ L'action COST 620 concerne la cartographie de la vulnérabilité et du risque pour la protection des aquifères carbonatés (karstiques) (2003).

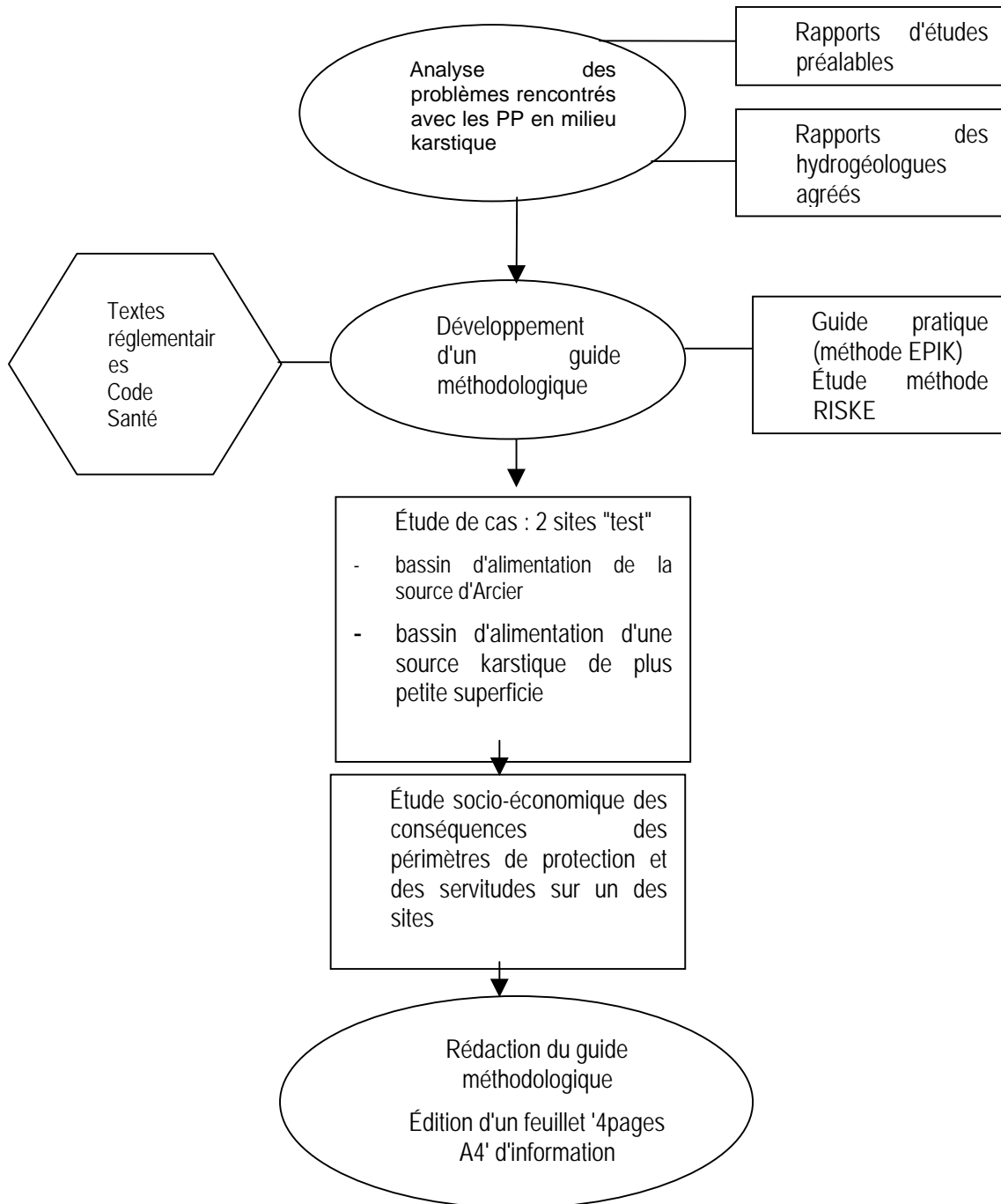


Illustration 1 – Organigramme de la démarche méthodologique de l'étude « Vulnérabilité des aquifères karstiques ».

2. Analyse des problèmes rencontrés lors de la délimitation des périmètres de protection en domaine karstique

2.1. RAPPEL DE L'INTERET DES PÉRIMÈTRES DE PROTECTION ET DES MISSIONS DE L'HYDROGÉOLOGUE AGREE

Dans le but d'assurer à l'ensemble de la population une alimentation en eau potable qui satisfasse aux exigences de la santé publique, le législateur a édicté un ensemble de lois, règlements... destiné à protéger les points de captage d'eau potable contre toute dégradation de la qualité naturelle de l'eau captée du fait des activités humaines (article L. 20 du code de la santé publique, décret 89-3 du 3 janvier 1989, arrêté du 10 juillet 89, circulaire du 24 juillet 1990, très détaillée sur les périmètres de protection (PP), arrêté du 31 août 1993, circulaire du 5 avril 1994, etc.). Cette protection repose essentiellement sur la définition des périmètres de protection, c'est-à-dire des zones sur lesquelles les activités humaines seront réglementées afin de ne pas dégrader la qualité des eaux susceptibles de parvenir au captage par infiltration ou par ruissellement.

La délimitation des périmètres de protection pour les captages en milieu karstique présente des difficultés. La procédure requise est générale, applicable à tous les aquifères. Seule la prescription de certaines mesures concerne le milieu karstique. Le caractère obligatoire d'instauration des périmètres de protection et de l'acte de la DUP (déclaration d'utilité publique) a été reconnu par la loi sur l'Eau en 1964 et réaffirmée par celle de janvier 1992. Les servitudes qu'implique la mise en œuvre des périmètres de protection sont ainsi mentionnées.

Le travail de l'hydrogéologue agréé, lorsqu'il définit les Périmètres de Protection (PP), passe donc en premier lieu par la délimitation du bassin d'alimentation du point d'eau considéré et en deuxième lieu par la prise en compte d'autres paramètres hydrogéologiques (vitesse de circulation de l'eau, débit de la nappe, etc.) pour définir les trois Périmètres de Protection réglementaires (Périmètre de Protection Immédiat (PPI), Périmètre de Protection Rapproché (PPR) et Périmètre de Protection Eloigné (PPE), ce dernier n'étant pas obligatoire. Son travail reposera donc en grande partie sur les études préalables fournies par le Maître d'ouvrage (MO) (études géologiques, hydrogéologiques, environnementales, etc.). S'il juge que ces études préalables sont insuffisantes, c'est-à-dire qu'elles ne lui donnent pas tous les éléments nécessaires pour déterminer les périmètres de protection d'une manière fiable, il peut alors demander au maître d'ouvrage des études complémentaires.

La mission de l'Hydrogéologue Agréé va donc se décomposer en 2 parties :

- prise de connaissance du dossier préparatoire établi par le maître d'ouvrage et la Missions InterServices de l'Eau (MISE) et première visite de terrain pour définir le cas échéant, le cahier des charges des études complémentaires à réaliser,
- définition des périmètres de protection et prescriptions y afférant en fonction de l'ensemble des données existantes, des études préalables et des études /analyses complémentaires et des reconnaissances de terrain ; proposition de servitudes et de travaux de mise en conformité pour les activités existantes dans les zones du bassin d'alimentation couvertes par les périmètres de protection.

Quant aux études préalables nécessaires à l'intervention de l'Hydrogéologue Agréé, on rappelle que ce sont des études hydrogéologiques approfondies et qu'elles ont un caractère obligatoire depuis 1995 pour tous les captages importants. Ces études doivent fournir notamment les informations relatives au temps de transfert des polluants jusqu'au captage, le temps nécessaire pour qu'il y ait dispersion, dégradation et ou fixation. Au vu de l'hétérogénéité de la structure des systèmes karstiques et de la dualité des écoulements, le temps de transfert ne doit pas être considéré comme le critère prépondérant ; il conduirait à retenir la totalité du bassin d'alimentation en périmètre de protection rapprochée.

La description du contenu du cahier des charges des études préalables pour un captage AEP existant et/ou nouveau servira de référence pour l'établissement du cahier des charges pour les études spécifiques au milieu karstique.

2.2. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE MISE EN OEUVRE

La protection des captages en milieu karstique (captages de sources ou forages) présente des difficultés lorsqu'il s'agit de les protéger, au niveau du point d'eau et de son bassin d'alimentation. Ces difficultés sont étroitement liées à la nature du milieu karstique : discontinu, hétérogène (cavités de dissolution, réseau de drainage, fissures,...), dualité au niveau de l'infiltration (concentrée ou diffuse) et des écoulements souterrains (rapides et lents). L'objectif étant de proposer un guide méthodologique pour établir les périmètres de protection en milieu karstique, une première partie repose sur l'étude et l'analyse de cas concrets pour mettre en évidence les points de blocage et les points efficaces vis-à-vis de la protection des captages en milieu karstique.

Ainsi une étude de l'existant est effectuée. Elle débute par un double inventaire :

- Celui des problèmes tels qu'ils sont rencontrés, soit au niveau des dossiers d'études préalables à l'intervention de l'Hydrogéologue Agréé, soit au niveau du rapport de l'Hydrogéologue Agréé proprement dit,
- Celui des approches utilisées pour délimiter les PP qu'elles soient, ou non, en accord avec les lignes directrices des grands axes réglementaires généraux et en distinguant les grands types de situations rencontrées (taille des bassins d'alimentation, occupation du sol, etc.).

Afin de couvrir l'ensemble des cas possibles, il a été convenu de consulter une dizaine de rapports d'études préalables et de rapports d'hydrogéologues agréés pour des captages AEP de contexte karstique en veillant à leur représentativité, de la région d'une part et des problèmes rencontrés d'autre part. La sélection des rapports a été faite en étroite collaboration avec la DIREN FRC.

2.3. ANALYSE DES DOSSIERS

Les dossiers retenus pour cette analyse sont les suivants :

| N° | Nom du captage | Commune d'implantation | Département | Ordre de grandeur de la surface du bassin d'alimentation |
|----|-----------------------------|------------------------|-------------|--|
| 1 | Source d'Arcier | Arcier | Doubs | 100 km ² |
| 2 | Source du Grand Gît | Chaux-Neuve | Doubs | Environ 1 km ² |
| 3 | Source des Touvières | Deluz | Doubs | Environ 1 km ² |
| 4 | Source de la Tuffière | Lods | Doubs | Environ 3,5 km ² |
| 5 | Source des Nuets | Chantrans | Doubs | Moins d'un km ² |
| 6 | Source de Froidefontaine | Vaucluse | Doubs | 12 à 13 km ² |
| 7 | Source de Montorge | Lemuy | Jura | 1,5 à 2 km ² |
| 8 | Source Crêpot | Uzelle | Doubs | 2 km ² ou plus |
| 9 | Source de la Cheneau | Choux | Jura | 4 m ² au total, bassins jointifs |
| 10 | Sources de la Combe-Lambert | Choux | Jura | |
| 11 | Sources des Cernois | Choux | Jura | |
| 12 | Forage d'En-Mienne | Choux | Jura | |

Illustration 2 - Dénomination des dossiers étudiés.

Sur les 12 dossiers étudiés, il n'y a qu'un seul forage. Tous les autres captages sont des captages de sources. On peut penser que cette proportion, moins de 10 % de forages, est vraisemblablement conforme à la proportion réelle des forages sur l'ensemble des captages en milieu karstique du massif jurassien.

Pour chacun de ces dossiers, l'ensemble des pièces, issues des archives de la DIREN Franche-Comté, a été parcouru. Les différentes études, enquêtes et mesures réalisées dans le cadre du dossier d'études préalables ont été inventoriées et le raisonnement mis en œuvre par l'Hydrogéologue agréé pour définir les périmètres de protection a été reconstitué.

A partir des dossiers étudiés et des caractéristiques du milieu karstique, les études, mesures ou enquêtes utiles à la détermination des périmètres de protection en milieu karstiques sont les suivantes :

1) Délimitation et étude du bassin d'alimentation :

- étude géologique et hydrogéologique (tectonique, lithostratigraphie, relief, hydrographie etc.),
- traçages,
- inventaire des points d'eau,
- inventaires de phénomènes karstiques,
- étude du ruissellement,
- levés complémentaires géologique, hydrogéologique ou de formations superficielles,
- bilan hydrologique,
- modélisation (en fonction de l'importance de la source, modélisation globale généralement de type « boîte noire »).

2) Analyse du point d'eau capté :

- constitution du captage et conditions de l'émergence (une ou plusieurs sorties d'eau, etc.),
- mesures de débit sur le captage,
- suivi de la qualité sur le captage (turbidité notamment, etc.),
- pompages d'essai (essentiellement pour les forages).

3) Analyse des points d'eau voisins (il est instructif de suivre les points d'eau voisins aussi bien sur le bassin d'alimentation qu'à l'extérieur) :

- mesures de débits sur des sources voisines,
- suivi de la qualité sur des sources voisines (turbidité notamment, etc.),
- traçages.

4) Etude environnementale :

- carte de vulnérabilité,
- enquête pédologique ou agro-pédologique,
- enquête d'occupation des sols,
- enquête d'environnement (éléments polluants tels que décharges, stockages, voies de transport, etc. [aléas])
- étude de risque [croisement carte de vulnérabilité et carte d'aléas].

Dans l'analyse des dossiers étudiés, la plupart des études listées ci-dessus ont été rencontrées. Elles ont été réalisées soit dans le cadre des études préalables, soit directement dans le cadre de l'intervention de l'hydrogéologue agréé (cas pour les petits captages).

Le compte rendu de l'analyse des dossiers est donné à l'annexe 1. L'illustration 2, ci-dessus donne l'essentiel de cette analyse.

Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques

| n° | captage | surface du bassin | environnement, structure | | étude préalable | |
|----|---|-------------------|--|---|---|---|
| | | | points forts | points faibles | points forts | points faibles |
| 1 | source d'Arcier à Vaire-Arcier (Doubs) | 100 km2 ou plus | | points d'engouffrement en zone semi urbaine | nombreux traçages | |
| | | | | | structure géologique assez bien connue | |
| | | | | | occupation des sols bien inventoriée | |
| | | | | | | |
| 2 | source du Grand-Gît à Chaux-Neuve (Doubs) | moins d'un km2 ? | | | | structure du bassin d'alimentation non étudiée |
| | | | | | | pas d'étude critique de l'extension du bassin d'alimentation |
| | | | | | | pas de mesures du débit |
| | | | | | | pas de traçage |
| 3 | source des Touvières à Deluz (Doubs) | environ 1 km2 | environnement entièrement boisé | | structure assez bien connue et assez typée (carte géologique) | débits non mesurés |
| | | | | | | sources environnantes non recherchées |
| | | | | | | conditions d'émergence non étudiées |
| | | | | | | |
| 4 | source de la Tuffière à Lods (Doubs) | environ 3,5 km2 | environnement favorable (naturel, inhabité, etc ...) | | structure géologique bien étudiée | étude des débits à préciser, notamment en crues |
| | | | | | traçages nombreux et bien adaptés au problème à résoudre | conditions d'émergence non étudiées |
| | | | | | | |
| 5 | source des Nuets à Chantrans (Doubs) | moins d'un km2 | | village dans le bassin d'alimentation | bonne étude agro-pédologiques | l'étude environnementale a été faite avant la détermination par traçages du bassin d'alimentation |
| | | | | environnement agricole avec élevage et épandages de lisiers | propositions détaillées de bonnes pratiques agricoles | |
| | | | | sol mince sur calcaires fissurés constitutifs du réservoir aquifère | traçages pour déterminer le bassin d'alimentation | |
| | | | | | | |

Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques

| | | | | | | |
|----|---|---|--|---|---|---|
| 6 | source de Froidefontaine à Vaucluse (Doubs) | environ 12 à 13 km2 | | une route départementale passe juste au-dessus de la source | nombreux traçages | pas d'étude de l'environnement en surface |
| | | | | plusieurs hameaux dans le bassin d'alimentation | structure géologique | |
| | | | | | condition d'émergence de la source | |
| | | | | | étude des débits de la source par installation d'une station de jaugeage | |
| 7 | source de Montorge à Lemuy (Jura) (source qui alimente Arc-sous-Montenot dans le Doubs) | 1,5 à 2 km2 environ | environnement entièrement boisé | pointes de turbidité fortes et prolongées | bonne étude de la turbidité | pas de réelle étude du bassin par la structure |
| | | | | pollutions bactériennes fréquentes | | étude de la turbidité pas assez exploitée |
| | | | | | | pas d'étude des débits |
| | | | | | | suite au 2 traçages de 1997 pour lesquels aucune réapparition de colorant n'a pu être mise en évidence, il aurait fallu refaire des traçages sur d'autres points d'infiltration pour avoir une évaluation fiable du bassin d'alimentation |
| 8 | source Crêpot à Uzelle (Doubs) | | | | | |
| | | 2 km2 ou plus | | source captée en zone semi-urbaine | étude fine d'occupation des sol dans le bassin déterminé à priori (par la structure) captage techniquement bien décrit | les 2 traçages réalisés n'ont rien donné (colorant retenu dans les argiles ?) ; il n'y a donc pas de confirmation du bassin d'alimentation |
| 9 | source de la Cheneau, | les bassins d'alimentation de tous ces points | | | | |
| 10 | sources de la | d'eau sont jointifs | | | | |
| 11 | Combe-Lambert, sources des | et l'ensemble est évalué à priori à | environnement entièrement boisé pour les sources | | | pas de traçage |
| 12 | Cernois, forage d'En-Mienne à Choux (Jura) | au moins 4 km2 | | | | pas d'étude des débits pour le forage, pas d'étude de bassin d'alimentation ni du réservoir capté |

Illustration 3 - Analyse des dossiers de protection des captages en milieu karstique.

Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques

| n° | captage | ordre de grandeur de la surface du bassin d'alimentation | Critères distance, temps de transfert / zone d'appel, bassin d'alimentation | Types d'études préalables | | | | | | | | |
|----|---|--|--|---------------------------|----------|--------|----------|-----------------------|---------|---------------------------------|---------------------------|--|
| | | | | Traçages | géologie | Chimie | Pompages | Bilan hydrologique | Modèles | Etude occupation des sols | Carte de vulnérabilité | études concernant les bassins limitrophes |
| 1 | source d'Arcier à Vaire-Arcier (Doubs) | 100 km2 ou plus | Bassin d'alimentation | oui | oui | | non | oui ? | non | oui | oui ? | oui (traçages) |
| 2 | source du Grand-Gît à Chaux-Neuve (Doubs) | moins d'un km2 ? | Bassin topographique | non | non | non | non | non | non | oui | non | non |
| 3 | source des Touvières à Deluz (Doubs) | environ 1 km2 | Bassin d'alimentation | non | oui | non | non | non | non | oui | non | non |
| 4 | source de la Tuffière à Lods (Doubs) | environ 3,5 km2 | Bassin d'alimentation | oui | oui | non | non | oui ? | non | oui | non | oui (traçages) |
| 5 | source des Nuets à Chantrans (Doubs) | moins d'un km2 | bassin d'alimentation | oui | | non | non | non | non | oui | oui | |
| 6 | source de Froidefontaine à Vaucluse (Doubs) | environ 12 à 13 km2 | bassin d'alimentation | oui | | non | non | non | non | non | non | oui (structure géologique, traçages) |

Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--|--|-----------------------|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 7 | source de Montorge à Lemuy (Jura) (source qui alimente Arc-sous-Montenot dans le Doubs) | 1,5 à 2 km2 environ | bassin d'alimentation | oui | | oui | non | non | non | non | non | |
| 8 | source Crêpot à Uzelle (Doubs) | 2 km2 ou plus | bassin d'alimentation | oui | oui | non | non | non | non | oui | oui | |
| 9 | source de la Cheneau, | les bassins d'alimentation de tous ces points d'eau sont jointifs et l'ensemble est évalué à priori à au moins 4 km2 | estimation rapide | non | | non | non | non | non | non | non | non |
| 10 | sources de la Combe-Lambert, | | | non | | non | non | non | non | non | non | non |
| 11 | sources des Cernois, | | | non | | non | non | non | non | non | non | non |
| 12 | forage d'En-Mienne à Choux (Jura) | | | estimation rapide cercle | non | | non | oui | non | non | non | non |

Illustration 4 - Bilan des études réalisées dans les dossiers analysés.

L'illustration 3, ci-dessus établit le bilan des études réalisées dans chaque dossier analysé.

Etude géologique et hydrogéologique préliminaire : étude des cartes géologiques et topographiques et/ou étude documentaire plus détaillée).

Cette étude permet :

- de déterminer de quel niveau géologique provient l'eau,
- d'établir une première délimitation du bassin d'alimentation, quitte à la modifier à la suite des études complémentaires,
- de définir les opérations de traçage à mettre en œuvre pour préciser l'extension du bassin d'alimentation.

Sur les douze périmètres analysés, huit ont fait l'objet d'une étude de ce type. Les quatre autres concernent :

- la source du Grand Gît,
- les trois sources captées de Choux.

Pour ces points d'eau, le bassin topographique a été retenu pour le périmètre de protection éloigné. Ce choix peut être justifié en périodes de pluie quand l'entraînement par le ruissellement prédomine, mais le bassin d'alimentation souterrain n'a pas forcément les mêmes contours.

Par ailleurs, pour la source du Grand-Gît, l'étude préliminaire indique à priori que l'eau est issue du karst du Jurassique supérieur, ce qui est peu probable, sauf peut être en très hautes eaux ; le niveau d'origine de l'eau pour cette source n'est ainsi pas réellement déterminé : – formations glaciaires ou formations crétacées sous-jacentes ? – si bien qu'il n'est pas assuré que cette source soit bien karstique.

Essais de traçages artificiels

Sur les 12 points d'eau analysés, des traçages ont été réalisés pour 6 d'entre eux. Les points suivants n'ont pas fait l'objet d'un essai de traçage :

- la source du Grand Gît,
- la source des Touvières à Deluz : dans ce cas, la structure est suffisamment bien délimitée et de petite taille pour qu'il ne soit pas absolument nécessaire de faire des traçages (le bassin d'alimentation, de plus est totalement boisé),
- les 4 points d'eau de Choux.

Sur un autre point, la source des Nuets à Chantrans, des traçages ont été réalisés, mais après des études fines, notamment une étude agro-pédologique ; or ces traçages ont montré que le bassin d'alimentation de la source ne correspondait pas à la zone de l'étude agro-pédologique qui couvrait un bassin d'alimentation évalué à priori.

Il apparaît ainsi que les traçages sont à réaliser en deuxième lieu, après l'étude géologique, cette dernière permettant d'établir une première délimitation, assez fiable en principe, du bassin d'alimentation.

Sur deux dossiers, les traçages n'ont pas donné de résultats (le colorant n'est ressorti sur aucun des points d'eau surveillés) :

- la source de Montorge à Lemuy,
- la source Crêpot à Uzelle.

Dans le premier cas, la structure géologique du bassin d'alimentation n'a pas été réétudiée pour chercher de nouveaux points d'injection (notamment le rôle des grandes failles longitudinales situées non loin à l'Est du captage n'a pas, semble-t-il, été pris en considération). Sur le deuxième point, il semble bien que le traceur ait été retenu dans les formations superficielle (les traçages ont été faits en période d'étiage).

Analyse physico-chimique de l'eau

Hors analyses de contrôle réglementaire, la physico-chimie de l'eau des sources n'a pas été étudiée, à deux exceptions près :

- la source de Montorge à Lemuy où la turbidité a été suivie en continu pendant 5 mois (2 mesures par jours),
- la source de Froidefontaine à Vaucluse où la turbidité et le débit ont été suivis en continu pendant plusieurs mois.

Dans le cas de la source de Froidefontaine, au contraire, turbidité et débit ont été suivis en même temps durant plusieurs mois.

Dans le cas de la source de Montorge, des conclusions ont été formulées concernant le fonctionnement karstique de la source ; cependant, il semble que les résultats de cette étude de la turbidité n'aient pas été suffisamment exploités : les MES auraient pu être étudiées pour déterminer leur provenance (karst ou ruissellement de surface). Par ailleurs il est regrettable que cette étude fine de la turbidité n'ait pas été couplée avec une étude des débits.

Pompages d'essai et suivi des débits des sources

Les pompages d'essai sont l'investigation de base pour tout captage d'eau par forage. Pour le seul captage par forage étudié ici, le forage d'En-Mienne à Choux, il y a bien eu réalisation d'un pompage d'essai. Pour les captages de sources, l'essai de pompage n'est pas une investigation adéquate dans la mesure où seul le débit naturel de la source est prélevé ce qui est le cas des 11 sources étudiées ici. Les mesures de débits sont par contre importantes à réaliser.

Seuls deux des captages étudiés ont fait l'objet d'enregistrements de débit :

- la source d'Arcier à Arcier, qui est équipée d'une station de jaugeage limnimétrique permanente,

- la source de Froidefontaine à Vaucluse où il y a eu un suivi des débits durant plusieurs mois.

Quelques-unes des autres sources étudiées ont fait l'objet de mesures ponctuelles de débits ou plutôt de simples évaluations à partir des relevés de compteur. Il y a donc globalement peu de valeurs précises de débit ; plusieurs valeurs de débit pour une source donnée et sur un cycle hydrologique ou plusieurs cycles hydrologiques sont rares voire font défaut.

Bien qu'en relation directe avec les mesures de débits, les conditions d'émergence sont très rarement étudiées : y a-t-il d'autres sorties d'eau aux abords immédiats de l'émergence captée (sorties d'eau permanentes ou ne fonctionnant qu'en hautes eaux) ? le débit de la source captée correspond-il au débit total ou est-ce un débit partiel ?

Il faut signaler cependant les difficultés fréquemment rencontrées sur les sources captées pour faire des mesures de débit correctes (difficultés pour mesurer à la sortie des drains, compteur sur la conduite de départ mais trop-plein inaccessible, sorties d'eau plus ou moins diffuses autour de la chambre de captage, etc.).

Bilan hydrologique

Aucun bilan hydrologique n'a été effectué dans le cadre de ces études. L'établissement du bilan hydrologique permettrait de conforter la taille du bassin d'alimentation auparavant déterminé sur des bases géologiques et hydrogéologiques et de résultats d'essais de traçage artificiel. Un tel bilan, pour être exploité pleinement, doit s'intégrer parmi des bilans sur des bassins voisins ou des bilans régionaux afin de permettre des comparaisons chiffrées. L'établissement d'un bilan hydrologique en milieu karstique n'est pas toujours aisé ; la délimitation du bassin peut varier selon les conditions hydrologiques, l'ETP reste le facteur avec le ruissellement qui posent le plus grand problème de détermination. Le bilan hydrologique reste donc approximatif et permet d'obtenir un ordre de grandeur pour la superficie du bassin d'alimentation.

Modélisation

Aucun des points d'eau étudiés n'a fait l'objet d'une modélisation. Pour ce qui est d'une modélisation selon une approche différences finies ou éléments finis, elle est en effet difficilement réalisable en milieu karstique, sauf à rester très grossière. Elle peut être effectuée si le milieu peut être considéré comme fissuré homogène (équivalent continu poreux). Par contre, une modélisation de type pluie-débit est un complément utile pour préciser un bilan hydrologique de bassin d'alimentation et apporter des éléments sur le modèle conceptuel du système (modèle global à réservoirs, ou modèle global de type « traitement du signal » : détermination de l'hydrogramme unitaire et modélisation inverse).

Occupation des sols

Les points d'eau suivants ont fait l'objet d'une étude d'occupation des sols détaillée et/ou d'une étude de risques sur le bassin d'alimentation :

- source d'Arcier à Arcier (occupation des sols par parcelle sur une partie du bassin d'alimentation),
- source du Grand-Gît à Chaux Neuve (étude de risques liés à une route),
- source des Nuets à Chantrans (étude agro-pédologique fine débouchant sur des recommandations agri-environnementales),
- source Crêpot à Uzelle (occupation des sols par parcelle sur tout le bassin d'alimentation).

L'analyse des dossiers montre que des études d'occupation des sols ont été conduites chaque fois que l'environnement sur le bassin d'alimentation était fortement aménagé (villes, villages, voies de transport, etc. : source d'Arcier ; élevage intensif : source des Nuets ; cultures, vergers : source Crêpot). Aucune étude d'occupation des sols n'a été faite lorsque le bassin d'alimentation était occupé soit par des forêts soit par des prés.

Carte de vulnérabilité

Des inventaires de phénomènes karstiques en tant que tels n'ont jamais été réalisés dans les 12 dossiers analysés. Il est cependant vraisemblable que chaque fois qu'il a eu des expériences de traçage sur le bassin d'alimentation, des points d'injection ont été recherchés en préalable et donc un début d'inventaire a été réalisé. Un inventaire à part entière des phénomènes karstiques couplé, d'une part avec un inventaire des traces de ruissellement (et des traces de zones infiltrantes diffuses ou ponctuelles) et, d'autre part avec un levé détaillé des formations superficielles, paraît cependant une base indispensable pour établir une carte ou un zonage de la vulnérabilité d'un bassin d'alimentation. La seule étude préalable qui s'apparente à une étude de vulnérabilité est l'étude agro-pédologique réalisée pour la source des Nuets à Chantrans. Malheureusement elle a été réalisée avant les traçages, si bien qu'il s'est avéré que la zone étudiée s'étendait en partie en dehors du bassin d'alimentation.

Autres

Sur trois captages, certaines des études ont été étendues aux bassins limitrophes du bassin d'alimentation du captage ; il s'agit à chaque fois d'études structurales et de traçages :

- source d'Arcier,
- source de la Tuffière,
- source de Froidefontaine.

Cette extension aux bassins limitrophes est souvent indispensable pour mieux délimiter le bassin d'alimentation. Ces extensions qui concernent les études structurales ou de traçages devraient aussi concerner les mesures de débit afin de

déterminer la nature respective des différentes sources de l'unité ou des unités karstiques du secteur (exutoire principal, source de trop plein, etc.) ce qui permettrait encore de préciser l'extension du bassin d'alimentation.

Enfin, rappelons une évidence, l'hydrogéologue agréé doit toujours effectuer des visites de terrain, de même que les réalisateurs de la plupart des études préalables. La visite de terrain de l'hydrogéologue agréé, absolument indispensable, outre les contacts qu'elle permet avec les gestionnaires du captage et l'examen du captage lui-même, doit être la visite qui chapeaute l'ensemble des études complémentaires, notamment c'est elle qui doit permettre à l'hydrogéologue agréé d'estimer, ou non, s'il y a besoin de telle ou telle étude complémentaire (en sus, naturellement, de l'examen du dossier qu'il lui a été fourni). Cette visite de l'hydrogéologue agréé, doit porter, outre sur le captage lui-même, sur l'ensemble du bassin d'alimentation. Il doit faire cette visite avec un œil géologique et hydrogéologique, naturaliste et scientifique, ce qui lui permettra :

- de préciser la nature géologique du bassin (limites, lithologie, tectonique, etc.),
- d'évaluer l'importance de la karstification (inventaire des phénomènes karstiques, actifs ou inactifs, etc.),
- la nature de la surface avec les traces observables de ruissellement (formations superficielles, pertes de ruissellement, etc.),
- les conditions d'émergence de la source captée (autres sorties d'eau, temporaires ou permanentes, à ses abords),
- d'inventorier l'ensemble des points d'eau sur le bassin d'alimentation et son pourtour,
- d'inventorier les activités humaines potentiellement polluantes,
- etc.

Remarques :

1) La présence d'une étude dans le dossier n'apporte pas en soi la réponse attendue si l'étude en question n'a pas été suffisamment approfondie. Ainsi, les expériences de traçage sur la source de Montorge à Lemuy et sur la source Crêpot à Uzelle ont été sans succès, mais elles n'ont pas été répétées, soit en une autre saison, soit en d'autres points. De même, le suivi de la turbidité a été insuffisamment exploité sur ces mêmes sources de Lemuy.

La raison est vraisemblablement à rechercher vers des problèmes de délais ou de coûts.

2) De même, la définition des PP² ne tient pas forcément compte des conclusions de telle ou telle étude préalable. Par exemple, à la source de Montorge à Lemuy, les

² PP : périmètre de protection
PPI : périmètre de protection immédiate
PPR : périmètre de protection rapprochée
PPE : périmètre de protection éloignée

grandes failles longitudinales mises en évidence par l'examen préalable de la géologie ne sont plus prises en considération pour la délimitation des PP, ni d'ailleurs pour le choix des points d'injection des expériences de traçage.

3) Enfin, dans le cadre de cette visite de terrain, en fonction :

- de la taille du bassin d'alimentation,
- de l'importance du captage (nombre de personnes desservies ou à desservir),
- du temps imparti pour donner un avis,

L'hydrogéologue agréé pourra estimer qu'il peut traiter lui-même d'une manière suffisamment approfondie toutes, ou l'une ou l'autre des tâches listées ci-dessus, ou bien au contraire les faire réaliser dans le cadre d'études préalables.

Critères de définition de PP :

Les critères retenus pour définir les PP, suite aux études préalables et à la visite de l'hydrogéologue agréé, sont basés sur le bassin d'alimentation souterrain du point d'eau considéré pour 6 points sur 12. Pour ces 6 points, il n'y a jamais eu de pondération en fonction des temps de transfert observés par traçages ou calculé ou évalués, ce qui est compréhensible, au vu de l'hétérogénéité des vitesses en milieu karstique. Pour ces 6 points, le bassin d'alimentation est couvert en totalité :

- soit par le PPE lorsque le bassin est étendu (cas de la source d'Arcier : un recouvrement complet par le PPR conduirait à des contraintes réglementaires inapplicables économiquement),
- soit par le PPR lorsque le bassin est peu étendu et, de plus, occupé majoritairement par des bois (cas de la source des Touvières à Deluz).

En outre pour la source d'Arcier, sont pris en considération les sous-bassins de surface qui envoient leurs eaux vers des pertes qui ressortent à la source elle-même (mis en évidence par des traçages). Pour ces sous-bassins, les zones de perte font l'objet de PPI, c'est à dire que le MO en est propriétaire et peut donc faire tout ce qu'il juge utile pour protéger ces points d'engouffrement des eaux. Ces PPI sont, en outre, entourés de PPR. Par contre, le captage lui-même, s'il fait l'objet, bien évidemment, d'un PPI, n'est pas entouré d'un PPR.

Pour les 6 autres points, les critères retenus pour définir les PP sont :

- pour la source du Grand-Gît à Chaux-Neuve, une évaluation a priori d'une zone proche du bassin topographique du point d'eau (ce qui n'est cependant pas sans intérêt, notamment en cas de ruissellement lors de fortes pluies). Le PPR couvre la zone la plus exposée au ruissellement aboutissant au captage (il n'y a pas de PPE),
- pour la source de Montorge à Lemuy, le PPE défini couvre vraisemblablement qu'une partie du bassin d'alimentation (les colorations n'ont pas donné de résultat et n'ont pas été recommencées aux mêmes points ou, mieux, en d'autres points) et un PPR qui prend en compte le ruissellement et l'infiltration aux abords du captage,

- pour les 3 sources de Choux, le PPE couvre une zone évaluée a priori et basée sur le bassin topographique sans le couvrir entièrement (le bassin topographique ne doit cependant pas être très différent du bassin souterrain) et le PPR qui s'étend sur une zone de ruissellement proche et directement orientée sur les captages,
- pour le forage d'En-Mienne à Choux, un cercle de 300 m de rayon constitue le PPE, sans investigations sur l'origine de l'eau puisée au forage.

En résumé,

- les PPI, outre le point de captage (obligatoire) peuvent intégrer des zones de pertes en relation directe avec le captage même si elles sont lointaines, situées à plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres du captage au sein du bassin d'alimentation
- les PPR couvrent le bassin d'alimentation lorsqu'il est petit et à couverture essentiellement naturelle, ou bien les zones proches du captage et soumises à un ruissellement aboutissant directement à celui-ci, ou bien encore entourent les PPI annexes,
- les PPE couvrent l'ensemble du bassin d'alimentation lorsqu'il est étendu, ou bien une partie seulement (dans ce dernier cas, sans que ce soit toujours argumenté), ou bien encore n'existent pas (lorsque le PPR couvre tout le bassin d'alimentation ou pour d'autres raisons qui ne sont alors pas argumentées). L'extension de ceux ci traduit en quelque sorte la difficulté rencontrée avec l'application de périmètres très étendus, de manière réaliste.

2.4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La détermination des périmètres de protection en milieu karstique pour les cas étudiés n'est pas toujours fondée sur tous les résultats des études préalables. Des éléments structuraux importants tels que des failles ne sont pas considérés lors de la délimitation des périmètres de protection.

Le périmètre de protection rapprochée est appliqué à tout le bassin d'alimentation si l'occupation du sol le permet ou sa surface n'est pas importante. Si la surface du bassin est trop importante (> 5 km²) ou si l'occupation du sol ne le permet pas, l'ensemble du bassin d'alimentation se voit classé en périmètre de protection éloignée. Rares sont les périmètres de protection immédiate ou rapprochée disjoints au sein du bassin d'alimentation, en dehors de la zone de captage. Cette attribution de PPE ou PPR met en évidence les difficultés auxquelles sont confrontés les hydrogéologues agréés, sans outil permettant de caractériser la vulnérabilité intrinsèque du milieu et le risque au niveau du bassin d'alimentation du captage concerné.

Cette première partie indique la nécessité de formaliser une démarche, de développer une méthodologie de caractérisation de la vulnérabilité du karst afin de disposer d'un outil objectif permettant d'asseoir la définition des périmètres de protection en considérant les zones de différentes intensités de vulnérabilité ainsi que les risques de contamination.

3. Méthode de cartographie et guide méthodologique

3.1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Vulnérabilité des eaux souterraines**

« La vulnérabilité à la contamination est définie comme étant la protection naturelle contre la contamination ».

Le concept est basé sur l'hypothèse suivante : l'environnement physique fournit une protection naturelle des eaux souterraines vis-à-vis des impacts anthropiques, essentiellement les contaminants pouvant pénétrer l'environnement souterrain (Vrba & Zaporozec, 1994).

La vulnérabilité est une propriété relative, non mesurable et sans dimension. Il faut distinguer la vulnérabilité intrinsèque (naturelle) de la vulnérabilité spécifique (Vrba & Zaporozec, 1994). La première ne dépend que des propriétés naturelles du milieu, alors que la seconde intègre en plus les propriétés mêmes du contaminant.

La vulnérabilité a été définie dans le cadre de l'action européenne COST 620 (COST ACTION 620 (2003) – Vulnerability and Risk mapping for the Protection of Carbonate (karst) aquifer (homepage :<http://capella.unine.ch/chyn/pdf/FinalReportCOST620.pdf>) :

- La **vulnérabilité intrinsèque** des eaux souterraines aux contaminants prend en considération les caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, mais est indépendante de la nature des contaminants et des scénarios de contamination.
- La **vulnérabilité spécifique** considère les propriétés d'un contaminant en particulier or d'un groupe de contaminants en plus de la vulnérabilité intrinsèque du milieu.

La caractérisation de la vulnérabilité est une approche qualitative et non quantitative ; cette dernière correspondrait à modéliser l'aquifère karstique. L'inconvénient d'utiliser une approche qualitative est le suivant : une propriété non précisément définie, ne peut être déduite sans ambiguïté de quantité mesurée. La question de la validation reste problématique.

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur un modèle « origine-écoulements-cible ». Dans le cadre de la cartographie de la vulnérabilité, on suppose que la contamination prend place au niveau de la surface (abstraction faite de fuites de réseau d'assainissement enterré par ex.) : c'est l'**origine**. Le terme **écoulements** correspond au trajet du contaminant de son point d'origine à travers le système (zone non saturée et/ ou zone saturée jusqu'au point d'eau) jusqu'à la cible à protéger. La **cible** est quant à elle l'eau souterraine qui fait l'objet d'une protection : pour la

protection de la ressource, il s'agit de la surface des eaux souterraines (interface entre la zone non saturée et la zone saturée) et pour la protection d'une source, il s'agit du captage d'eau (forage, exutoire) (COST 620).

- **Vulnérabilité et directive européenne sur l'eau**

L'annexe II, section 2.1 du rapport de l'action COST 620 fait référence à une caractérisation initiale des toutes les masses d'eau souterraine, évaluant leurs usages et leur degré d'exposition à un risque vis-à-vis de la préservation de leur état initial. La caractérisation initiale est effectuée à partir des données hydrogéologiques, géologiques, pédologiques, d'aménagement du territoire, d'exploitation et de débits concernant essentiellement la masse d'eau souterraine concernée. Les formations de couverture de la zone de recharge de l'aquifère sont considérées dans le cadre de cette caractérisation. Les masses d'eau présentant un risque doivent être caractérisées plus précisément en considérant notamment les informations suivantes :

- caractéristiques géologiques et hydrogéologiques (conductivité hydraulique, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, stratification, niveaux imperméables ou semi-imperméables),
- caractéristiques des formations superficielles de couverture (sol, dépôts de surface) : épaisseur, coefficient d'emmagasinement, conductivité hydraulique et propriétés d'adsorption,
- inventaire des systèmes de surface associés avec lequel la masse d'eau souterraine est en relation dynamique,
- les directions et les vitesses d'échange de l'eau entre les eaux de surface et les eaux souterraines,
- calcul de la recharge annuelle de la masse d'eau souterraine.

Cette synthèse des informations retenues, bien qu'établie pour caractériser les masses d'eau souterraine, peut aussi être à l'usage de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu karstique.

L'évaluation de la vulnérabilité et l'approche de cartographie présentée dans le cadre de COST 620 sont directement liés au type d'informations requises dans le cadre de la démarche Directive européenne sur l'eau pour les masses d'eau souterraine.

- **Méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines**

La vulnérabilité des eaux souterraines est déterminée à partir de différentes méthodes de cartographie. On distingue parmi ces méthodes, notamment les méthodes de cartographie à index. Ces méthodes sont les suivantes :

- Les **méthodes de cartographie à index** : elles sont basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres (sols, géologie, profondeur de la nappe,...) d'une région en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. Dans les premières méthodes tous les paramètres avaient le même poids, leur importance

relative vis-à-vis de la vulnérabilité n'était donc pas prise en compte. Ces méthodes se veulent plus quantitatives.

- Les **modèles de simulation** : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques qui représentent les processus couplés qui régissent les transports de contaminants. Cette catégorie comprend les méthodes basées sur les modèles simples de transport ainsi que les solutions analytiques ou numériques pour des modèles en une dimension de transport de contaminants à travers la zone non saturée, ou encore des modèles couplés saturé-insaturé, multiphase, à deux ou trois dimensions.
- Les **méthodes statistiques** : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractérisations sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude.

• **Description et comparaison des principales méthodes**

Une brève description des principales méthodes utilisées dans différents contextes hydrogéologiques et à différentes échelles est donnée dans ce paragraphe. Un tableau comparatif est proposé.

- **DRASTIC** La méthode a été développée par l'EPA³ aux Etats-Unis en 1985 et Aller *et al.* en 1987 afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines. Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur 7 paramètres :

Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone and hydraulic Conductivity.

Chaque paramètre est cartographié avec un index allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération est ensuite appliqué aux différents paramètres afin de relativiser leur importance respective en terme de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des 7 paramètres selon la formule suivante :

| | |
|------|--|
| Avec | D_i : index de vulnérabilité global d'une unité cartographique |
| | W_j : facteur de pondération du paramètre j |
| | R_j : index du paramètre j |

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=7} (W_j R_j)$$

La méthode propose deux systèmes de pondération suivant les conditions d'utilisation du sol : utilisation normale et avec une activité agricole importante (pesticides).

³ Environmental Protection Agency

| Paramètre | Facteur de pondération "normal" | Facteur de pondération "pesticides" |
|---|------------------------------------|--|
| Depth to water (profondeur jusqu'à la nappe phréatique) | 5 | 5 |
| net Recharge (recharge nette) | 4 | 4 |
| Aquifer media (type d'aquifères) | 3 | 3 |
| Soil media (nature du sol) | 2 | 5 |
| Topography (topographie) | 1 | 3 |
| Impact of the vadose zone (impact de la zone non saturée) | 5 | 4 |
| hydraulic Conductivity (conductivité hydraulique) | 3 | 2 |

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser les zones à risque, plus l'index de vulnérabilité est élevé, plus le potentiel de contamination de l'eau souterraine est élevé.

Cette méthode est principalement utilisée pour la cartographie à grande échelle (région, état) aux Etats-Unis. Son efficacité reste encore à prouver à cause de ces limites, en effet, cette méthode ne semble pas assez flexible pour s'adapter à des besoins spécifiques. L'index final de vulnérabilité prend en compte un trop grand nombre de paramètres (7) ce qui implique que l'influence d'un paramètre particulièrement important pour une certaine thématique peut être « masqué » par les autres paramètres pris en compte.

- La méthode **SINTACS** est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus petite échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie.

Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

Soggiacenza (Profondeur à la nappe), **I**nfiltrazione (Infiltration), **A**zione del **N**on Saturo (Fonction de la zone non saturée), **T**ipologia della Copertura (sol), **C**aratteri Idrogeologici dell' **A**cquifero (Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère), **C**onducibilità Idraulica (conductivité hydraulique), et **A**clività della **S**uperficie Topografica (Pente moyenne de la surface topographique).

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des classes de pondération différentes selon les situations. L'index de vulnérabilité I_v est calculé selon la formule suivante :

$$I_v = \sum P_{(1,7)} W_{(1,n)}$$

Avec : $P_{(1,7)}$: index des paramètres 1 à 7
 $W_{(1,n)}$: poids correspondant à chaque classe, il varie de 1 à n

Les index résultant de cette méthode sont divisés sous forme de pourcentage et ensuite divisés en intervalles qui ont été définis sur la base de 500 tests, et groupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les 7 mêmes paramètres que DASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération. L'utilisateur code les données d'entrée de la méthode en fonction des situations locales de chaque cellule avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions.

La différence principale entre DRASTIC et SINTACS sont les valeurs des index, la sélection des classes de pondération et la stratégie de leur combinaison.

- **Méthodes développées dans le cadre de l'action COST 620 (PI, COP (K))**

- **Méthode PI (Goldscheider, 2000) :**

Cette méthode a été développée dans le cadre de l'action COST620 et cofinancée par le BGR, à l'université de Karlsruhe (Allemagne). Cette méthode a été appliquée à 12 systèmes karstiques dans 7 pays européens. Le concept général est le suivant: c'est une méthode orientée Système d'Information Géographique, qui est basée sur le concept « origine-écoulement-cible » ; la cible est la surface piézométrique et non la source ou le captage. C'est une méthode de caractérisation de la vulnérabilité de la ressource et non du captage de la source.

Cette méthode repose essentiellement sur la caractérisation spatiale de deux critères: P pour la couverture Protectrice et I pour les conditions d'infiltration. Le premier critère P est subdivisé en 5 classes, de 1 faible degré de protection à 5 fort degré de protection. La détermination des classes de ce critère repose sur une méthode développée par Hölting en Allemagne (illustration 5).

T – Sol superficiel

| eFC[mm] jusqu'à 1m épaisseur | T |
|------------------------------|-----|
| > 250 | 750 |
| > 200-250 | 500 |
| >140-200 | 250 |
| >90-140 | 125 |
| >50-90 | 50 |
| <50 | 0 |

Recharge – R

| Recharge [mm/an] | R |
|------------------|------|
| 0-100 | 1,75 |
| >100-200 | 1,50 |
| >200-300 | 1,25 |
| >300-400 | 1,00 |
| >400 | 0,75 |

S -Sous-sol

| Type de sous-sol (distribution de la taille des grains) | S |
|--|-----|
| Argile | 500 |
| Argile, faiblement silteuses | 400 |
| Faiblement argilo-sableux | 350 |
| Silteux-argileux, limoneux argileux | 320 |
| Limoneux argileux | 300 |
| Argileux silteux, argileux sableux | 270 |
| Silteux limoneux | 250 |
| Faiblement argilo-limoneux, argilo-silteux-limoneux | 240 |
| Très limoneux silteux, limono-silteux | 220 |
| Très argilo-sableux, sablo-silto-limoneux, faiblement sablo-limoneux, limoneux silteux, argilo-silteux | 200 |
| Limoneux sableux, faiblement limoneux silteux | 180 |
| Faiblement argilo-silteux, sablo-limono-silteux, silt, très sablo-limoneux | 160 |

S -Sous-sol

| Type de sous-sol (distribution de la taille des grains) | S |
|---|-----|
| Très argilo-sableux, argilo-sableux, limoneux-silteux-sableux | 140 |
| Sablo-silteux, très limono-sableux | 120 |
| Limono-sableux, très silto-sableux | 90 |
| Sableux faiblement argileux, sable silteux, gravier et sable argileux | 75 |
| Sable faiblement limoneux, gravier sablo-silteux | 60 |
| Sable faiblement silteux, sable faiblement silteux avec graviers | 50 |
| Sable | 25 |
| Sable avec graviers, gravelo-sableux | 10 |
| Graviers, graviers avec brèches | 5 |
| Matériel volcanique non consolidé (pyroclastique) | 200 |
| Tourbe | 400 |
| Sapropèle | 300 |

Lithologie – L

| Lithologie | L |
|--|----|
| Argiles, marnes, silts | 20 |
| Grès, quartzite, roche volcanique, plutonite, métamorphites | 15 |
| Grès poreux, roche volcanique poreuse | 10 |
| Conglomérat, brèches, calcaire, roche dolomitique, roche gypsifère | 5 |

Fracturation – F

| Fracturation | F |
|--|-----|
| Non jointifs | 25 |
| Faiblement jointifs | 4 |
| Faiblement karstifié, phénomènes karstiques colmatés | 1 |
| Karstifié modéré ou phénomènes karstiques non colmatés | 0,5 |
| Fortement fracturé ou fortement karstifié et non colmaté | 0,3 |
| Epikarst développé, non colmaté | 0 |
| Non connu | 1 |

Epaisseur de chaque strate [m] – M

Bedrock – B
B = L * F

Pression artésienne – A
1500 points

Illustration 5 : Détermination du critère P de la méthode PI, d'après la méthode d'Höltling (1995).

La fonction « de totale protection » est calculée comme suit :

$$P = [T + (\sum S * M + \sum B * M)] * R + A$$

Le résultat de P peut être classé en 5 classes de vulnérabilité comme il est exprimé dans le tableau ci-dessous (Hötling, 1995) :

| Résultat P | Efficacité de la protection | P-facteur |
|--------------|-----------------------------|-----------|
| 0-10 | Très bas | 1 |
| > 10-100 | Bas | 2 |
| > 100-1000 | Modérée | 3 |
| > 1000-10000 | Elevée | 4 |
| > 10000 | Très élevée | 5 |

Illustration 6 - Classes de vulnérabilité de la méthode PI.

La méthode d'Hötling est une méthode intégratrice ; elle détermine une valeur d'indice pour 5 classes différentes, en considérant d'une part l'épaisseur des formations, la nature du sol sensu stricto, la recharge (quantité en mm), la lithologie et l'intensité de fracturation.

Le critère I caractérise les conditions d'infiltration : la valeur de I est comprise entre 1 et 0, avec I = 1 correspondant à une infiltration diffuse, 0 < I < 1 pour des écoulements latéraux de surface et de subsurface, et I = 0 correspond à une infiltration ponctuelle.

La caractérisation repose sur la prise en compte de concepts hydrologiques tels que l'existence d'écoulement latéral, d'écoulement Hortonien et d'écoulement préférentiel via une perte ou un gouffre

Le Facteur de protection Π résultant est la multiplication de l'indice des critères P et I, soit $P * I$; $\Pi >$ ou $= 1$ signifie un degré de protection très faible, une vulnérabilité extrême à la pollution ; $\Pi = 5$ signifie un fort degré de protection et une très faible vulnérabilité (illustration 7).

| | Carte de vulnérabilité | | Carte P | | Carte I | |
|---------------|------------------------|-----------------|-------------|------------|-------------|-----------|
| | Description | π - facteur | Description | P- facteur | Description | I-facteur |
| Rouge | Extrême | 0-1 | Très faible | 1 | Très élevée | 0.0-0.02 |
| Orange | Haute | > 1-2 | Faible | 2 | Elevée | 0.4 |
| Jaune | Modérée | > 2-3 | Modérée | 3 | Modérée | 0.6 |
| Vert | Faible | > 3-4 | Elevée | 4 | Faible | 0.8 |
| Bleu | Très faible | > 4-5 | Très élevée | 5 | Très faible | 1.0 |

Illustration 7 - Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST 620).

- **Méthode LEA** – (approche européenne) cette méthode est basée sur deux facteurs, à savoir la couverture protectrice et les conditions d'infiltration, donnant un cadre plutôt que des schémas d'évaluation de la vulnérabilité. Une des différences avec la méthode PI, est qu'elle n'a pas recours à l'usage d'indice numérique (illustration 8).

| Couverture protectrice | Vulnérabilité | Temps de transfert estimé |
|--|---------------|-------------------------------|
| Roche calcaire karstique dénudée ou sol très fin, pelliculaire | Extrême | Instantanée – quelques heures |
| Sol, dépôt < 3 m épaisseur | Très élevée | Quelques heures, < 1 jour |
| Limons 1-3 m épaisseur, dépôts fins | Elevée | Jours - < 1 mois |
| Argiles > 1 m, limons > 4 m | Modérée | > 1 mois |
| Argiles > 2 m, limons > 40 m | Faible | > 1 an |
| Argiles > 12 m épaisseur | Très faible | 10 ans |

Illustration 8 - Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif (COST 620).

- **Méthode COP**

Cette méthode, conçue comme devant être un outil pratique et utile, est une méthode détaillée, décrivant les facteurs, leur caractérisation, indice et pondération ; elle a été développée dans le cadre de l'action COST 620 par le groupe d'hydrogéologie de l'université de Malaga, avec le soutien financier du ministère espagnol de la recherche et de la science, ainsi que des groupes de recherche d'Andalousie. Les facteurs O, C et P de l'approche européenne de cartographie de la vulnérabilité ont été caractérisés, classifiés considérant les résultats des réflexions des groupes de travail et leur combinaison et pondération déterminées. La définition des classes de vulnérabilité a été établie. La méthode développée a été testée sur deux sites dans le Sud de l'Espagne ; les cartes de vulnérabilité résultante doivent encore faire l'objet d'investigation de validation à l'aide d'essais de traçage artificiels et l'utilisation d'autres outils hydrogéologiques.

Cette méthode, avec ces trois facteurs, C, O et P, est une méthode de caractérisation de la ressource et non d'une source ou d'un captage ; pour la caractérisation de la

vulnérabilité d'une source, le recours à un paramètre supplémentaire K est nécessaire.

Les trois facteurs de la méthode « COP » sont :

- C - concentration du flux en distinguant la recharge par les pertes, avens (scenario A) du reste du bassin d'alimentation (scenario B),
- formations superficielles de couverture résultant du croisement entre épaisseur, nature de la couverture (sol et formations lithologiques)
- P - Précipitation obtenue en croissant les notions de quantité et d'intensité

L'indice COP est obtenu à partir de la relation suivante :

$$COP-induce = (C \text{ résultat}) * (O \text{ résultat}) * (P \text{ résultat}).$$

| COP indice | Classes de vulnérabilité |
|------------|--------------------------|
| [0-0.5] | Très élevée |
| [0.5-1] | Elevée |
| [1-2] | Modérées |
| [2-4] | Faible |
| [4-15] | Très faible |

Illustration 9 - Indice "COP" utilisé pour la cartographie de la vulnérabilité (Vias et al., 2002).

L'indice C résulte du scénario A ou du scénario B. L'indice C pour le scénario A est équivalent à la valeur de la distance du point de la perte ou de l'aven (dh) multipliée par l'indice de pente et de végétation (sv) multipliée par la distance au cours d'eau (ds). La valeur de l'indice C est comprise entre 0 et 1, correspondant à une très forte respectivement une très faible réduction de la protection.

| Distance à la perte (m) | Valeurs de dh | Pente | Végétation | Valeur Sv | Distance au cours d'eau avec pertes | Valeurs ds |
|-------------------------|---------------|---------|------------|-----------|---|------------|
| >= 500m | 0 | <= 8 % | - | 1 | < 10 m | 0 |
| [500-1000] | 0.1 | 8-31 % | Yes | 0.95 | 10-100 m | 0.5 |
| [1000-1500] | 0.2 | 8-31 % | No | 0.9 | > 100 m | 1* |
| [1500-2000] | 0.3 | 31-76 % | Yes | 0.85 | | |
| [2000-2500] | 0.4 | 31-76 % | No | 0.8 | * même s'il n'y a pas de cours d'eau avec une perte | |
| [2500-3000] | 0.5 | >76 % | - | 0.75 | | |
| [3000-3500] | 0.6 | | | | | |
| [3500-4000] | 0.7 | | | | | |

| | | | | | |
|-------------|-----|--|--|--|--|
| [4000-4500] | 0.8 | | | | |
| [4500-5000] | 0.9 | | | | |
| > 5000 | 1.0 | | | | |

Illustration 10 - Composés du Flux pour déterminer l'indice C selon le scénario A, $C = (dh) * (ds) * (sv)$ (Vias et al., 2002).

| | Formations superficielles | | | Pente | Végétation | Valeur |
|---|---------------------------|-----------|-------------|---------|------------|--------|
| | Absence | Perméable | Imperméable | | | |
| Phénomènes karstiques | | | | < = 8 % | - | 0.75 |
| Karst développé | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 8-31 % | Oui | 0.8 |
| Objets karstiques peu développés ou objets de dissolution | 0.5 | 0.75 | 1 | 8-31 % | Non | 0.85 |
| Karst fissuré | 0.75 | 0.75 | 1 | 31-76 % | Oui | 0.9 |
| Absence de phénomènes karstiques | 1 | 1 | 1 | 31-76 % | Non | 0.95 |
| | | | | > 76 % | - | 1 |
| | Sf | | | | | Sv |

Illustration 11 - Composés du flux pour déterminer l'indice C pour le scénario B, $C = (sf) * (sv)$ (Vias et al., 2002).

Concernant la définition de l'indice C, il résulte de l'addition des indices O_s et O_L . O_s est défini à partir de la combinaison de la structure et de la texture du sol de la façon suivante :

| Epaisseur (m) | Structure/Texture | | | |
|---------------|-------------------|------------|----------|----------------------------|
| | Argileux | Silteux | Limoneux | Sableux |
| | > 30% argile | > 70% Silt | Le reste | > 70% sable + <=15% argile |
| > 1.0m | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 0.5-1.0m | 4 | 3 | 2 | 1 |
| < 0.5m | 3 | 2 | 1 | 0* |

* aussi quand absence de sol

Illustration 12 - Indice d' O_s (Vias et al., 2002).

L'indice O_L est défini à partir de la lithologie et de l'épaisseur de chaque formation située au-dessus de l'aquifère. L'indice peut être multiplié par une valeur afin de

prendre en compte les aquifères captifs (optionnel): captif (*2), semi-captif (* 1.5) et libre (*1).

| Lithologie et fracturation | Valeur « formations » V « f » | Indice « formations » I « f » (= V « f » * épaisseur (m)) | Valeur de O _L |
|--|----------------------------------|---|--------------------------|
| Argiles | 1500 | [0-250] | 1 |
| Silt | 1200 | [250-1000] | 2 |
| Marnes et métapellites and roches ignées non fissurées | 1000 | [1000-2500] | 3 |
| Calcaires marneux | 500 | [2500-10000] | 4 |
| Métapellites et roches ignées fissurées | 400 | [> 10000] | 5 |
| Conglomérats et brèches cimentées non fissurés conglomerates and breccias | 100 | | |
| Grès | 60 | | |
| Conglomérats et brèches faiblement cimentés ou fissurés | 40 | | |
| Sable et graviers | 10 | | |
| Basaltes perméables | 5 | | |
| Roches carbonatées fissurées | 3 | | |
| Roches karstifiées | 1 | | |

Illustration 13 - Indice pour O_L (Vias et al., 2002).

Le facteur P (précipitation) est optionnel ; il peut être déterminé et utilisé lorsque l'objet de la cartographie de la vulnérabilité concerne plusieurs bassins d'alimentation avec une recharge fortement hétérogène, et lorsqu'une comparaison de la vulnérabilité des bassins est recherchée. Ce facteur n'est pas un facteur strictement intrinsèque. Pour les valeurs proposées pour l'indice P, le lecteur peut se rapporter au rapport COST 620 ou à la référence de Vias et al., 2002.

La méthode « COP » est similaire à la méthode « PI », intégrant la recharge comme paramètre à part entière. Les paramètres utilisés sont relativement simples à obtenir et la méthode est applicable de manière aisée. Par contre, le nombre important de calcul de valeurs d'indice, nécessite d'effectuer les compilations des cartes à l'aide d'un système géographique traitant des images « RASTER » (à chaque cellule est attribuée une valeur). Cette méthode a été utilisée dans le cadre de l'action COST 620. À cause de l'écart important entre les valeurs des indices des différents paramètres, des biais

statistiques peuvent apparaître dans l'obtention des valeurs de vulnérabilité pour la carte résultante. Comment justifier une valeur de 1500 vis-à-vis d'une valeur de 1 pour un indice par exemple ? De plus, tous les indices ne possèdent pas le même nombre de classes.

• **Méthodes spécifiques au karst (EPIK, RISKE) :**

- Méthode EPIK

La méthode EPIK a été **développée spécifiquement** pour évaluer la **vulnérabilité des aquifères karstiques** en Suisse dans le but de délimiter des périmètres de protection à partir d'une carte de vulnérabilité (Doerfliger, 1996) pour l'OFEFP⁴. Cette méthode permet de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis à vis de tout type de contaminants.

La méthode EPIK prend en compte 4 paramètres :

Epikarst, **Protective Cover** (couverture protectrice : sol), **Infiltration Conditions** (conditions d'infiltration), **Karst network development** (développement de la karstification). Ces critères correspondent à quatre aspects spécifiques de l'organisation des écoulements en milieu karstique. La méthode EPIK permet donc d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines en milieu karstique aux influences naturelles et anthropogènes de manière globale et rigoureuse.

Chaque paramètre est divisé en classes qui traduisent des degrés d'impact vis à vis d'une pollution. Un coefficient multiplicateur (facteur de pondération) est appliqué à chaque paramètre afin de traduire l'importance relative des paramètres les uns par rapport aux autres. Sur cette base l'indice final de vulnérabilité est calculé (facteur de protection) selon la formule suivante :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l$$

Avec : $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficients de pondération de chacun des critères
 E_i, P_j, I_k, K_l : valeur de chacun des critères indexés

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des critères indexés de la méthode EPIK, la valeur la plus basse correspondant à la situation la plus vulnérable :

| Epikarst | | | Protective cover | | | | Infiltration conditions | | | | Karst development | | |
|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------|----------------|--|-------------------|----------------|--|
| E ₁ | E ₂ | E ₃ | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | I ₁ | I ₂ | I ₃ | | K ₁ | K ₂ | |
| 1 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | |

⁴ Office Fédéral de l'Environnement, la Forêt et le Paysage helvétique

Le tableau ci-dessous récapitule les facteurs de pondération appliqués aux critères de la méthode EPIK, le facteur le plus important est appliqué au critère qui contribue principalement à la valeur du facteur de protection :

| Critère | E | P | I | K |
|------------------------|----------|---------|----------|----------|
| Facteur de pondération | α | β | γ | δ |
| Poids relatif | 3 | 1 | 3 | 2 |

Le facteur de protection F est calculé en tous points du bassin d'alimentation, plus la valeur du facteur F est élevée, plus le pouvoir de protection est important.

Les valeurs de F sont comprises entre 9 et 34, elles sont regroupées en 4 classes de vulnérabilité :

- S1** : Vulnérabilité très élevée (F entre 9 et 19)
- S2** : Vulnérabilité élevée (F entre 20 et 25)
- S3** : Vulnérabilité moyenne (F entre 26 et 34)

La vulnérabilité est faible quand $F > 25$ avec des critères tels qu'un sol de faible perméabilité d'une épaisseur supérieure à 8 m combiné à des localisations en bas de pente jouant le rôle de collecteur des eaux.

3.2. MÉTHODE RISKE

La méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques RISKE a été développée dans le cadre d'un séjour Post-Doctoral en entreprise entre janvier 1999 et juin 2000. Il s'agit d'un cofinancement de la région Languedoc-Roussillon avec l'Entreprise ANTEA, le laboratoire d'encadrement scientifique étant le BRGM (Service EAU à Montpellier).

La méthode **RISKE** est une méthode multicritère de type *Point Count Système Models (PCSM)* ou méthode à index avec pondération des critères. Elle a pour but d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques.

Cette approche est dérivée de la méthode EPIK développée en Suisse par Doerfliger (1996) pour "*évaluer la sensibilité des eaux souterraines des régions karstiques aux influences naturelles et anthropiques de manière globale et rigoureuse*".

La méthode **RISKE** prend en compte 5 critères qui permettent de définir l'architecture de l'aquifère et l'organisation des écoulements dans le milieu karstique : **R**oche aquifère, **I**nfiltration, **S**ol, **K**arstification et **E**pikarst (illustration 14 et illustration 15).

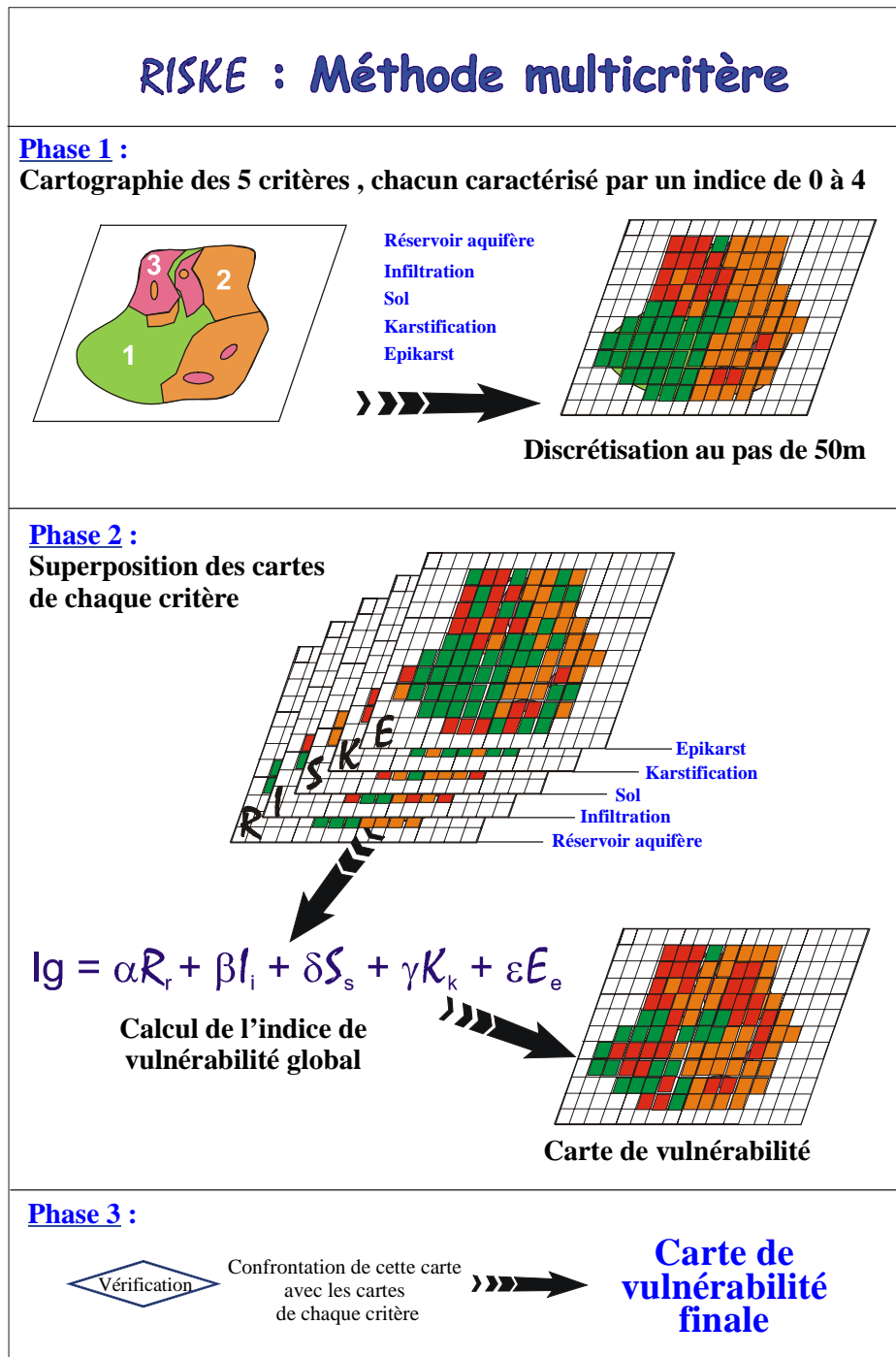


Illustration 14 - Diagramme explicatif de la méthode RISKE (Pételet et al., 2001).

| Critères | | Caractéristiques | | | | | | Index | Poids | | | |
|----------------|-----------------------------|--|---|---------------------|---------------------|---|---|-----------------------|---------------------|------------|--------------------|---|
| R | Roche aquifère | R ₀ | Marnes | | | | | | 0 | 0.1 | | |
| | | R ₁ | Marno-calcaires | | | | | | 1 | | | |
| | | R ₂ | Calcaires marneux | | | | | | 2 | | | |
| | | R ₃ | Calcaires et dolomies massifs en gros bancs non fracturés, Calcaires en petits bancs avec fracturation homogène | | | | | | 3 | | | |
| | | R ₄ | Calcaires en gros bancs massifs fracturés | | | | | | 4 | | | |
| I | Infiltration | I ₀ | Pente très forte > 50% | | | | | | 0 | 0.4 | | |
| | | I ₁ | Pente forte (15 et 50%) | | | | | | 1 | | | |
| | | I ₂ | Pente moyenne (5 et 15%) | | | | | | 2 | | | |
| | | I ₃ | Pente faible (0-5%), zones cultivées (sol travaillé perpendiculairement à la pente) | | | | | | 3 | | | |
| | | I ₄ | Bassin versant alimentant une perte | | | | | | 4 | | | |
| S | Sol (Horizon protecteur) | Sol sur matrice nue ou avec un horizon géologique faiblement protecteur (éboulis, alluvions) | | | | Sol sur horizon géologique important de faible conductivité hydraulique (argiles, argiles marneuses, conglomérats et brèches massifs) | | | | 0.1 | | |
| | | Nature de sol inconnue | Nature * de sol connue | | | Nature de sol inconnue | Nature * de sol connue | | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | | |
| | | S ₀ | - | - | - | - | Couverture protectrice >5m (avec sol ou non) | | | | 0 | |
| | | S ₁ | Epaisseur >100 cm | Epaisseur >100 cm | - | - | Couverture protectrice 1-5m ou <1m avec un sol de texture inconnue ou de type 1 >20cm | | | | 1 | |
| | | S ₂ | Epaisseur 20-100 cm | Epaisseur 20-100 cm | Epaisseur >100 cm | - | Epaisseur 0-20 cm | Epaisseur 0-20 cm | Epaisseur 20-100 cm | | - | 2 |
| | | S ₃ | Epaisseur 0-20 cm | Epaisseur 0-20 cm | Epaisseur 20-100 cm | Epaisseur >100 cm | Absence totale de sol | Absence totale de sol | Epaisseur 20-100 cm | | Epaisseur 0-100 cm | 3 |
| S ₄ | Absence totale de sol | Absence totale de sol | Epaisseur 0-20 cm | Epaisseur 0-100 cm | - | - | - | - | 4 | | | |
| K | Karstification | K ₀ | Aquifère peu ou pas fissuré | | | | | | 0 | 0.2 | | |
| | | K ₁ | Aquifère fissuré mais non karstifié | | | | | | 1 | | | |
| | | K ₂ | Réseau mal karstifié ou mauvaise connection avec la surface | | | | | | 2 | | | |
| | | K ₃ | Réseau karstique bien développé, présence d'un drain collecteur de petite taille connu (ou présumée d'un gros) connecté avec la surface. Traçage à circulation rapide | | | | | | 3 | | | |
| | | K ₄ | Réseau karstique bien développé, présence d'un gros collecteur connecté avec la surface. Traçage à circulation rapide | | | | | | 4 | | | |
| E | Epikarst | E ₀ | Zone sans modelé karstique identifié | | | | | | 0 | 0.2 | | |
| | | E ₁ | Zone sans modelé karstique net | | | | | | 1 | | | |
| | | E ₂ | Lapiez, vallées sèches (+ bassin versant les alimentant) | | | | | | 2 | | | |
| | | E ₃ | Dolines et ouvalas | | | | | | 3 | | | |
| | | E ₄ | Avens | | | | | | 4 | | | |

* Nature des sols : c.f. tableaux 3 et 4

Illustration 15 - Classification des différents critères de la méthode RISKE (Pételet et al. 2001).

La méthode RISKE se déroule en cinq étapes essentielles :

- 1) **Cartographie de chaque critère** au 1/25 000^e ou 1/50 000^e suivant les données disponibles : **Roche** aquifère, **Infiltration**, **Sol**, **Karstification** et **Epikarst**. Chaque critère est subdivisé en classes matérialisées par un indice allant de 0 à 4.
- 2) *Cette étape de cartographie peut être réalisée avec un logiciel de SIG de type MapInfo.*
- 3) **Discrétisation des cartes** ainsi obtenues au pas de 50 m : maille de 50m sur 50m (guidée par le pas du **Modèle Numérique de Terrain** disponible sur la zone d'étude).
- 4) *La discrétisation peut se réaliser en passant d'une image en mode vecteur en une image en mode raster avec un logiciel de type IDRISI ou VERTICAL MAPPER.*
- 5) **Calcul de l'indice de vulnérabilité global Ig** en chaque maille. L'indice de classe de chaque critère est multiplié par le facteur de pondération du critère considéré (qui traduit l'importance relative des critères entre eux vis à vis de la vulnérabilité). Les valeurs obtenues pour les 5 critères sont ensuite additionnées pour obtenir l'indice de Vulnérabilité global **Ig**. Cette étape revient à superposer les 5 cartes des critères indexés afin d'obtenir une représentation cartographique de la répartition de l'indice Ig.
- 6) *Cette étape est largement facilitée par l'emploi d'un logiciel SIG de type IDRISI ou VERTICAL MAPPER.*
- 7) **Etape de régionalisation**. La valeur de l'indice Ig est ensuite subdivisée en 5 classes de vulnérabilité traduisant la sensibilité relative du milieu aux influences naturelles et anthropiques.
- 8) **Etape de vérification**. Cette carte de vulnérabilité est confrontée avec les cartes de chaque critère indexé afin de vérifier qu'il n'y a pas d'incohérence flagrante.

- **Essais de comparaison des différentes méthodes**

Les différentes méthodes de caractérisation de la vulnérabilité qu'elles soient généralistes ou spécifiques au karst ont certains paramètres en commun, tels que l'infiltration (y compris la pente) et la couverture protectrice. Les méthodes SINTACS et DRASTIC comprennent le plus de paramètres à caractériser. Tous ces paramètres ne sont pas pertinents et faciles à déterminer dans un milieu hétérogène de type karstique. Les méthodes proposées dans le cadre de l'action européenne reposent a priori sur peu de paramètres, mais en fait ce sont des paramètres intégrateurs. La lisibilité de la méthode n'est pas facilitée de la sorte. La caractérisation du paramètre P de la méthode PI par exemple repose sur différents critères certains liés à la nature de l'aquifère, à sa couverture mais aussi aux conditions climatiques avec la prise en compte de la recharge et également de l'artésianisme. La prise en compte de paramètre tel que la recharge peut être justifiée dans une approche régionale ou nationale où il est nécessaire d'intégrer la variabilité spatiale de la pluviométrie.

3.3. QUELS CRITÈRES RETENIR ?

Les critères retenus doivent satisfaire les conditions suivantes (Pételet *et al.* 2001) :

- **Pertinence** : chaque critère doit décrire ou caractériser physiquement un volume de l'aquifère pouvant avoir une incidence sur la vulnérabilité de la ressource et/ou de la source.
- **Indépendance** : indépendance des critères retenus, les uns entre les autres, c'est à dire ne pas caractériser une partie de l'aquifère ou le même fonctionnement. Plus le nombre de critère sera important, plus ils seront susceptibles d'être interdépendants.
- **Faisabilité** : facilité pour déterminer le critère sur le site d'étude, de manière qualitative ou semi-quantitative.

Afin qu'un tel outil de cartographie soit facile à mettre en œuvre dans le cadre d'études d'ingénierie, les critères ainsi que leur quantification doivent être clairement définis, d'une acquisition facile, ou déjà disponibles dans des études antérieures sur le site. Le coût global de la mise en œuvre de la cartographie doit rester acceptable.

Un grand nombre de critères peut être listé à partir des différentes méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères. La plupart des méthodes existantes ont été conçues pour les aquifères poreux ou des échelles régionales à nationales intégrant différents types d'aquifères : DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) , SINTACS (Civita, 1990), AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1993) , GOD (Foster, 1987), et utilisent les critères suivants :

- profondeur de la nappe,
- recharge nette de la nappe,
- caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère,
- caractéristiques du sol (perméabilité, épaisseur, composition minéralogique,...),
- topographie (pente),
- fonctionnement de la zone non saturée (connexion entre la surface et l'aquifère),
- conductivité hydraulique de l'aquifère,
- couverture végétale,
- caractéristiques géologiques (nature des lithologies, fracturation),
- densité du réseau hydrographique,
- infiltration,
- variation du niveau de la nappe.

Si la pertinence de ces critères n'est pas remise en cause pour la cartographie de la vulnérabilité des aquifères poreux, il n'est cependant pas possible de prendre en compte les mêmes paramètres pour les systèmes karstiques compte tenu de leur spécificité. Ainsi, la profondeur de la nappe n'est pas un critère pertinent pour les aquifères karstiques puisqu'elle ne conditionne pas le temps de transit de l'eau entre la surface et la nappe. Dans le cas des systèmes karstiques, c'est le développement et la répartition spatiale des conduits qui est déterminante ; en particulier lorsqu'on considère la vulnérabilité de la source, du captage et non celle de la ressource. Il conviendrait plutôt de distinguer par des indices différents les zones de recharge et de décharge de l'aquifère au lieu de la profondeur de la nappe, voire de tenter de prendre en considération la notion de gradient hydraulique indirectement.

De plus, en considérant les réflexions suite aux travaux de recherche effectués dans le cadre de DEA de Paris VI, sous l'encadrement de Valérie Plagnes (Maître de Conférence), sur la mise en œuvre de la méthode RISKE sur différents bassins d'alimentation, notamment ceux des systèmes karstiques du Larzac, il en ressort que les critères à considérer sont les suivants :

- **R** : critère **ROCHE**, décrit à partir de la nature des formations géologiques et de la fracturation qui les affecte. La lithologie doit être considérée et non la stratigraphie. Il s'agit bien d'un critère intrinsèque au système.
- **I** : critère **INFILTRATION**, permettant de distinguer l'infiltration diffuse de l'infiltration ponctuelle, une des caractéristiques de la recharge des systèmes karstiques. La pente est un des paramètres à considérer pour définir des classes au sein de ce critère. L'infiltration ponctuelle peut se faire au niveau de pertes, mais aussi de dolines. La distance au cours d'eau s'infiltrant dans le karst est un élément à considérer dans la définition des classes d'infiltration.
- **S** : critère **SOL**, comprenant la couverture protectrice de type sol et autres formations géologiques sus-jacentes à la roche aquifère en considérant d'une part l'épaisseur et la nature lithologique (notamment granulométrie, présence d'argiles) et d'autre part des indices morphologiques liés à l'existence ou l'absence d'un épikarst.
- **K** : critère **KARSTIFICATION**, caractérisé à partir d'une part d'observations spéléologiques au niveau des réseaux karstiques, d'autre part d'indice de caractérisation de fonctionnement hydrodynamique (vitesse d'essai de traçage, type de réaction hydraulique au niveau de la source suite à des événements pluvieux, voir une caractérisation du degré de karstification à partir de la méthode de Mangin (1975).

Le critère E épikarst de la méthode RISKE ou de la méthode EPIK, est regroupé dans le facteur I. Le rôle de protection de l'épikarst est lié à son rôle de stockage temporaire des eaux d'infiltration. De plus, l'épikarst est existant et développé lorsque la couverture de type sol n'est pas présente ou peu développée. Dans la méthode RISKE ou EPIK, il est caractérisé à partir de critères morphologiques. Il apparaît comme n'étant pas complètement indépendant du critère couverture protectrice.

La prise en compte de la puissance de la zone non saturée n'apparaît pas être un critère pertinent pour les systèmes karstiques ; elle peut être variable au sein du système et difficilement appréhensible de manière spatiale. De même, la notion de gradient hydraulique n'apparaît pas être un critère possible à prendre en considération en milieu karstique au vu de l'hétérogénéité du milieu.

3.4. RISK : UNE MÉTHODE MULTICRITÈRE

3.4.1. Introduction

Le choix d'une méthode de cartographie à index avec pondération des critères s'est imposé de lui-même compte tenu des résultats observés avec les différentes méthodes développées dans le passé.

La méthode retenue s'inspire de la méthode suisse EPIK et de la méthode RISKE, dérivée de cette dernière, en raison de leur spécificité envers les aquifères karstiques.

3.4.2. Principe de la méthode

La méthode se déroule en cinq étapes essentielles, telles que préconisées dans la méthode RISKE :

- (1) **Cartographie de chaque critère** au 1/25 000^e ou 1/50 000^e suivant les données disponibles : **K**arstification, **R**oche, **I**nfiltration et **S**ol. Chaque critère est subdivisé en classes matérialisées par un indice allant de 0 à 4.
Cette étape de cartographie peut être réalisée avec un logiciel de SIG de type MapInfo.
- (2) **Discrétisation des cartes** ainsi obtenues au pas de 50 m : maille de 50m sur 50m (guidée par le pas du **M**odèle **N**umérique de **T**errain disponible sur la zone d'étude).
La discrétisation peut se réaliser en passant d'une image en mode vecteur en une image en mode raster avec un logiciel de type IDRISI ou VERTICAL MAPPER.
- (3) **Calcul de l'indice de vulnérabilité global Ig** en chaque maille. L'indice de classe de chaque critère est multiplié par le facteur de pondération du critère considéré (qui traduit l'importance relative des critères entre eux vis à vis de la vulnérabilité). Les valeurs obtenues pour les 5 critères sont ensuite additionnées pour obtenir l'indice de Vulnérabilité global **Ig**. Cette étape revient à superposer les 5 cartes des critères indexés afin d'obtenir une représentation cartographique de la répartition de l'indice Ig.
- (4) **Etape de régionalisation.** La valeur de l'indice Ig est ensuite subdivisée en 5 classes de vulnérabilité traduisant la sensibilité relative du milieu aux influences naturelles et anthropiques.
- (5) **Etape de vérification.** Cette carte de vulnérabilité est confrontée avec les cartes de chaque critère indexé afin de vérifier qu'il n'y a pas d'incohérence flagrante.

3.4.3. Caractérisation des critères

La caractérisation des critères est décrite pour chacun des critères ; ces derniers sont identifiés à l'aide d'éléments de définition et sont classés en 5 classes, d'indice de 0 à 4, du moins au plus vulnérable, la classe intermédiaire 2 correspondant à l'alternative moyennement vulnérable.

Les 4 critères retenus sont ainsi définis en 5 classes dans les paragraphes ci-dessous.

- **Critère R « roche aquifère »**

Le premier des critères retenus est le type de formations qui constituent la roche aquifère. En effet, la **nature des formations géologiques** peut influencer les circulations de l'eau, et donc des polluants potentiels, à l'intérieur de l'aquifère.

La **fracturation** est prise en compte en même temps que la nature des formations géologiques. Nous avons choisi de ne pas associer de « périmètre de vulnérabilité » aux accidents sauf dans le cas où les failles majeures présenteraient de grandes zones de broyage associées. Dans ce cas, il conviendrait alors de tenir compte de la largeur de la zone de broyage par rapport à l'échelle de cartographie choisie.

La cartographie du critère **R** (lithologies et fracturation) est réalisée à partir des cartes géologiques au 1/50 000^e (éditions BRGM sur le territoire français). La cartographie peut être complétée par des visites de terrains en particulier pour observer le type de fracturation en présence et éventuellement évaluer l'importance des zones de broyage associées.

Le carte géologique répertorie toutes les formations affleurantes, quelles soient susceptibles d'être aquifères ou non. Dans une première étape, il est donc important de faire une sélection des formations à potentialité aquifère, les autres pouvant alors être considérées comme des formations de couverture qui seront associées au critère Sol.

Les différentes classes du critère **R** peuvent se résumer comme suit en leur affectant à chacune un index de vulnérabilité. Un index faible traduit une influence faible vis-à-vis de la vulnérabilité, un index fort traduit une forte influence sur la vulnérabilité.

| Critère | | Caractéristiques | Indice |
|---------|-----------------------------|---|--------|
| R | Nature de la roche aquifère | R ₀ Marnes (35-65 % de minéraux argileux) – faible propriétés aquifères | 0 |
| | | R ₁ Marnes- calcaires (25-35 % de minéraux argileux) – faible écoulement | 1 |
| | | R ₂ Calcaire avec marnes en interbancs, % minéraux argileux < 10-25 %. | 2 |
| | | R ₃ Calcaire massif et/ou dolomites avec bancs épais sans fractures, calcaires en bancs minces avec fractures (fracturation homogène), écoulement souterrain facile et rapide. | 3 |
| | | R ₄ Calcaire massif et/ou dolomites avec une forte intensité de fracturation et de karstification), écoulement souterrain facile et rapide, contamination rapide. | 4 |

Illustration 16 - Caractéristiques du critère R "roche aquifère"

• **Critère I « conditions d'infiltration »**

Dans le cadre de la détermination de la vulnérabilité des aquifères karstiques, ce n'est pas la quantité d'eau infiltrée qui importe mais la façon dont elle s'infiltré. La distinction essentielle se fait au niveau du mode de pénétration : infiltration diffuse/infiltration ponctuelle.

Les deux paramètres primordiaux retenus sont la pente qui va plus ou moins favoriser le ruissellement au détriment de l'infiltration et les pertes qui vont permettre une infiltration directe et très rapide de l'eau jusqu'à l'aquifère.

Le paramètre pente est divisé en 4 classes : pente faible de 0 à 5 %, pente moyenne de 5 à 15 %, pente forte de 15 à 50 % et pente très forte au-delà de 50 %. Ces classes (les 3 premières) sont similaires à celles retenus dans d'autres études (Suais *et al.*, 1990 ; Doerfliger, 1996, Desprats *et al.*, 1998).

La notion de présence d'indices karstiques, tels que des points d'infiltration possible, existant au niveau de la partie supérieure d'un aquifère karstique est également prise en compte dans la définition des 5 classes du critère infiltration. C'est la traduction du non fonctionnement de l'épikarst ou du « by pass » de l'épikarst, considéré comme un aquifère perché temporaire. Ainsi les pertes, les avens, les dolines et les vallées sèches considérés à différent degré comme des points ou des secteurs d'infiltration ont été intégrés.

La carte des pentes nécessaire à la délimitation des différentes classes est réalisée à partir du Modèle numérique de Terrain (MNT), à l'aide d'un logiciel SIG adapté.

Le tableau ci-dessous récapitule les différentes classes de vulnérabilité liées aux conditions d'infiltration.

| Critère | | Caractéristiques | Indice |
|---------|--------------|---|----------|
| I | Infiltration | I ₀ Très forte pente > 50% | 0 |
| | | I ₁ Forte pente (15-50%) | 1 |
| | | I ₂ Pente modérée (5-15%) et vallées sèches | 2 |
| | | I ₃ Faible pente (0-5%), zones cultivées perpendiculaires, dolines | 3 |
| | | I ₄ Pertes et bassin versant des pertes actives | 4 |

Illustration 17 - Caractéristiques du critère I « conditions d'infiltration »

• **Critère S « sol – couverture protectrice »**

Les formations pédologiques forment une couverture protectrice au-dessus des roches aquifères. Il est donc important d'évaluer le pouvoir protecteur et/ou régulateur de ces horizons vis à vis de polluants potentiels.

D'une manière générale, les sols ne sont pas très développés en région karstique et quand ils sont présents, ils sont très hétérogènes dans l'espace. Leur nature et leur épaisseur sont fortement influencées par la nature du substratum (calcaires, calcaires marneux) ainsi que par la morphologie (hétérogénéité des sols au sein d'une doline, par exemple). Même si l'on ne dispose que de peu d'information sur les sols, le paramètre le plus facilement accessible est l'épaisseur, soit à partir des cartes de sol de type INRA ou directement par des mesures à la tarière à main sur le terrain. Les photos aériennes et images satellites locales peuvent constituer une bonne source d'information en complément des cartes géologiques et des rapports d'étude ou thèses régionaux.

Comme nous l'avons vu dans l'analyse du critère R, une partie des roches affleurantes peut être considérée comme ayant un pouvoir protecteur important vis à vis des réservoirs aquifères. Il s'agit notamment des argiles, argiles marneuses, marnes, conglomérats et brèches massives principalement.

Ainsi, deux cas sont distingués pour la caractérisation du critère S :

- (i) Le cas concernant l'information pédologique proprement dite : deux possibilités se présentent : la seule donnée accessible est l'épaisseur du sol, et le cas où l'on peut avoir accès à des indications de texture et de proportion de cailloux, ;
- (ii) la présence ou non d'une couverture protectrice (horizon géologique) entre la roche et le sol.

Pour le premier cas, la détermination du critère S passe par la détermination de la nature du sol, de son épaisseur, telle que présentée ci-dessous :

Les indications pédologiques peuvent être obtenues grâce aux cartes pédologiques détaillées de l'INRA ou aux études pédologiques régionales.

Les paramètres importants en terme de protection, en plus de l'**épaisseur**, sont ceux qui vont conditionner l'infiltration plus ou moins rapide des polluants et les échanges susceptibles de se produire dans les horizons de sol. Nous avons retenu deux

paramètres essentiels qui sont la **texture** d'une part, définie à partir des teneurs en argile, limon et sable; la **teneur en cailloux** (pierrosité) d'autre part.

Le pourcentage de matière organique bien qu'important en terme de fixation de polluants n'a pas été retenu du fait de la difficulté d'avoir accès à ce paramètre en tout point du bassin.

(i) La texture

La texture est donc définie à partir de la teneur en argile, limon et sable. La répartition entre ces 3 éléments se fait à partir du triangle des textures couramment utilisé en pédologie.

Texture :

- AA** : d'argile
- A** : argileuse
- As** : d'argile sableuse
- ALS** : d'argile limon-sableuse
- AL** : d'argile limoneuse
- AS** : argilo-sableuse
- ASL** : lomonon-argilo-sableuse
- LA** : de limon argileux
- SL** : de sable limoneux
- SaL** : de sable argilo-limoneux
- Lsa** : de limon sablo-argileux
- L** : limoneuse
- LL** : de limon
- S** : sableuse
- LS** : de limon sableux
- SS** : de sable
- SA** : de sable argileux

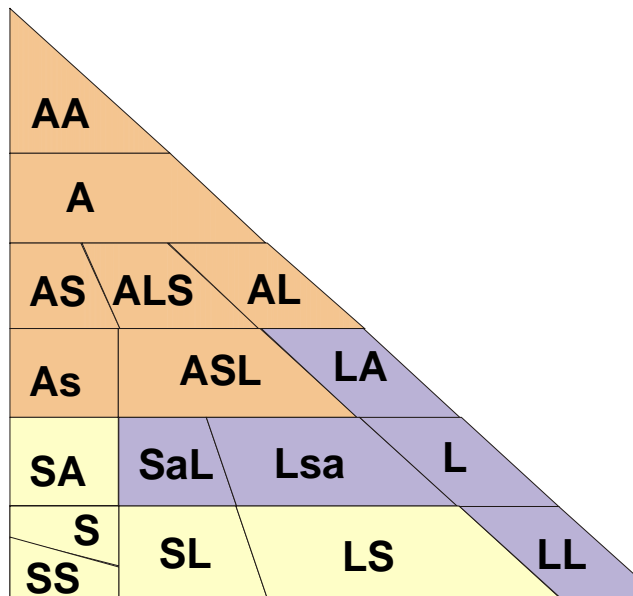


Illustration 18 - Triangle de la répartition des textures pour la classification des sols.

Nous avons choisi de regrouper les 17 textures différentes en **3 classes** simplifiant ainsi l'approche retenue par Suais *et al.* (1990) et Desprats *et al.* (1998) qui avaient retenu 5 classes.

- Classe **1** : texture à dominante d'**argile**
- Classe **2** : texture à dominante de **limon**
- Classe **3** : texture à dominante de **sable**

(ii) La proportion de cailloux

Ce paramètre a été retenu car il constitue l'un des facteurs essentiels pour favoriser l'infiltration.

Des études antérieures (Suais *et al.*, 1990 ; Desprats *et al.*, 1998) différenciaient 5 classes de teneurs en cailloux : 0–15 %, 15–30 %, 30–60 %, 60–90 et >90 %. Nous avons choisi de simplifier cette approche en ne retenant que 3 classes comme pour la texture :

- Classe **1** : proportion de cailloux : **0 – 15 %**
- Classe **2** : proportion de cailloux : **15 – 60 %**
- Classe **3** : proportion de cailloux : **> 60 %**

(iii) Détermination du paramètre nature du sol

Connaissant la texture et la proportion de cailloux des horizons de sol, nous pouvons croiser ces informations afin de déterminer un nouveau paramètre « nature du sol ». Pour cela, nous utilisons la matrice suivante :

| | | TEXTURE | | |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 1 (argile) | 2 (limon) | 3 (sable) |
| % CAILLOUX | 1 (0-15%) | 1 | 1 | 2 |
| | 2 (15-60%) | 1 | 2 | 3 |
| | 3 (> 60%) | 2 | 3 | 3 |

Illustration 19 - Matrice de détermination du paramètre nature du sol.

(iv) Détermination du critère S

Pour obtenir les classes du critère S , il suffit de croiser le paramètre nature de sol avec l'épaisseur selon la matrice suivante :

| | | NATURE DU SOL | | | |
|------------------|------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | <i>inconnue</i> | 1 | 2 | 3 |
| EPAISSEUR | 1 (> 100cm) | S1 | S1 | S2 | S3 |
| | 2 (20-100cm) | S2 | S2 | S3 | S4 |
| | 3 (0-20cm) | S3 | S3 | S4 | S4 |
| | 4 (nulle) | S4 | S4 | S4 | S4 |

En l'absence de données pédologiques relatives à la nature des horizons de sol, l'épaisseur est l'unique paramètre utilisé pour distinguer les différentes classes du critère sol.

Une classe supplémentaire a été ajoutée pour le cas où l'on est en présence d'un horizon géologique protecteur (faible conductivité hydraulique) de forte épaisseur induisant une influence négligeable à nulle sur la vulnérabilité.

Les différentes combinaisons possibles entre un sol reposant directement sur la roche ou sur une couverture protectrice de faible conductivité hydraulique et la connaissance plus ou moins détaillée de la nature des sols peuvent être synthétisées dans le tableau suivant :

| Critère | Caractéristiques | | | | | | | | Indice | | | | | |
|----------------------|-------------------------------------|--|----------------|-------------------------------|----------|---|-------------------------------|--|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| S | Sol (couverture protectrice) | Sol sur matrice nue ou avec un horizon géologique faiblement protecteur (éboulis, alluvions) | | | | Sol sur horizon géologique important de faible conductivité hydraulique (argiles, argiles marneuses, conglomérats et brèches massifs) | | | | | | | | |
| | | <i>Nature de sol inconnue</i> | | <i>Nature * du sol connue</i> | | | <i>Nature de sol inconnue</i> | | <i>Nature * de sol connue</i> | | | | | |
| | | "." | | 1 | 2 | | 3 | 1 | | | 2 | 3 | | |
| | | S₀ | | " | " | | " | Couverture protectrice > 5m (avec sol ou non) | | | 0 | | | |
| | | S₁ | | > 100cm | > 100cm | | " | Couverture protectrice 1-5m ou < 1m avec un sol de texture inconnue ou de type 1 >20cm | | | 1 | | | |
| | | S₂ | | 20-100cm | 20-100cm | | > 100cm | " | 0-20cm | | 0-20cm | 20-100cm | " | 2 |
| | | S₃ | | 0-20cm | 0-20cm | 20-100cm | > 100cm | absence totale de sol | absence totale de sol | | 20-100cm | 0-100cm | 3 | |
| S₄ | | Absence de sol | Absence de sol | 0-20cm | 0-100cm | " | " | " | " | 4 | | | | |

Illustration 20 - Caractéristiques du sol (Petelet et al., 2001).

Une classe supplémentaire a été prévue pour les cas où la couverture protectrice géologique de faible conductivité hydraulique est d'une importante épaisseur :

S₀: cette classe comprend toutes les zones du bassin d'alimentation pour lesquelles la formation géologique a une épaisseur supérieure à 5 mètres; on fait ainsi l'hypothèse que la protection de l'aquifère est quasi-totale.

S₁: cette classe comprend ainsi l'horizon géologique compris soit entre 1 et 5 mètres, soit inférieure à 1 mètre avec un sol non connu, ou un sol d'une épaisseur supérieure à 20cm.

S₂: cette classe comprend toutes les zones définies dans le tableau 15 ainsi que l'existence d'une couverture protectrice inférieure à 1mètre avec un sol de type 1 ou de type 3.

S₃: cette classe comprend les zones telles que définies dans le tableau 15 ainsi que l'existence d'une couverture protectrice inférieure à 1mètre sans sol, ou un sol de type 2 (20cm à 1m), ou moins d'un mètre de sol de type 3. Un sol d'une épaisseur de moins de 20cm de nature inconnue ou de type 1.

S₄: cette classe comprend toutes les zones du bassin d'alimentation sans sol, moins de 20cm de sol de type 2, moins d'1m de sol de type 3.

• **Critère K « Développement Karstique ou Karstification »**

La karstification du milieu est l'un des paramètres les plus importants qui conditionnent la vulnérabilité. C'est aussi un des critères les plus difficiles à appréhender. Ce critère permet de caractériser la vulnérabilité du milieu souterrain, la cible de la méthode de vulnérabilité étant la source ou le captage et non la ressource. Le développement du réseau karstique est donc à évaluer à partir de différentes méthodes, telles que l'analyse des hydrogrammes de crues (estimation du degré de karstification, du développement du réseau karstique de manière globale pour l'ensemble du bassin d'alimentation en fonction de la rapidité et du type de réponse observée à la source après des précipitations), la présence d'objets endokarstiques tels que des grottes, des réseaux explorés par les spéléologues ou encore à l'aide des vitesses de transit mises en évidence par les essais de traçage artificiels.

Une des méthodes d'analyse d'hydrogramme est la méthode développée par Mangin (1975). A condition de disposer d'une chronique de débits et de pluie sur au moins un cycle hydrologique, cette méthode permet de donner une bonne évaluation du développement du réseau karstique. La méthode est basée sur le pouvoir régulateur K de l'aquifère et un paramètre d'infiltration I. Le paramètre K est défini comme le rapport entre le volume dynamique (calculé en intégrant le débit entre le début du tarissement de la source et un temps infini) et le volume total écoulé au cours du cycle hydrologique moyen. Le paramètre i exprime l'importance du retard de l'arrivée des eaux d'infiltration à l'exutoire.

Les essais de traçage peuvent permettre d'identifier la présence ou non d'un karst actif. A titre indicatif, une vitesse de cheminement du traceur entre une perte et l'exutoire supérieure à 15m/h en basses eaux et supérieure à 75 m/h en hautes eaux permet d'admettre l'existence d'un réseau karstique (Doerfliger, 1996).

D'un point de vue de la vulnérabilité, les indications sur le degré du karstification peuvent être classées de la façon suivante :

| Critère | Caractéristiques | | Indice |
|---------|------------------|--|----------|
| K | ≃ | K ₀ Aquifère plus ou moins fissuré | 0 |
| | | K ₁ Aquifère fissuré mais sans karstification | 1 |

| | | |
|----------------|---|----------|
| K ₂ | Réseau karstique peu développé ou mal connecté avec la surface | 2 |
| K ₃ | Réseau karstique bien développé, présence de drains collecteurs de petite taille reconnus et connectés à la surface. Essais de traçage avec vitesse élevée. | 3 |
| K ₄ | Réseau karstique très bien développé, présence de drains collecteurs de grande taille, bien connectés à la surface. Essais de traçage avec vitesse élevée. | 4 |

Illustration 21 - Définition des classes du critère K « développement de la karstification »

3.5. INDICE GLOBAL DE VULNÉRABILITÉ

Calcul de l'indice global de vulnérabilité – système de pondération

Le calcul de l'indice global de vulnérabilité est effectué selon la formule suivante :

$$I_g = \alpha K_i + \beta R_j + \delta I_k + \gamma S_l$$

I_g : Indice global de vulnérabilité
 $\alpha, \beta, \delta, \gamma$: Poids de chacun des critères
 K_i, R_j, I_k, D_l : Valeur des critères indexés

Le tableau suivant synthétise les index et poids de la méthode **KRIS** :

| Critère | Index | | Poids | Index pondéré | |
|----------------|-------|-----|------------|---------------|-------|
| K ₀ | 0 | 0 | 0.3 | 0 | 0 |
| K ₁ | 1 | 64 | | 0.3 | 19.2 |
| K ₂ | 2 | 128 | | 0.6 | 76.8 |
| K ₃ | 3 | 191 | | 0.9 | 171.9 |
| K ₄ | 4 | 255 | | 1.2 | 306 |
| R ₀ | 0 | 0 | 0.1 | 0 | 0 |
| R ₁ | 1 | 64 | | 0.1 | 6.4 |
| R ₂ | 2 | 128 | | 0.2 | 12.8 |
| R ₃ | 3 | 191 | | 0.3 | 19.1 |
| R ₄ | 4 | 255 | | 0.4 | 25.5 |
| I ₀ | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 0 |
| I ₁ | 1 | 64 | | 0.5 | 32 |
| I ₂ | 2 | 128 | | 1.0 | 128 |
| I ₃ | 3 | 191 | | 1.5 | 286.5 |
| I ₄ | 4 | 255 | | 2.0 | 510 |

| | | | | | |
|----------------|---|-----|------------|-----|------|
| S ₀ | 0 | 0 | 0.1 | 0 | 0 |
| S ₁ | 1 | 64 | | 0.1 | 6.4 |
| S ₂ | 2 | 128 | | 0.2 | 12.8 |
| S ₃ | 3 | 191 | | 0.3 | 19.1 |
| S ₄ | 4 | 255 | | 0.4 | 25.5 |

Les cases grisées correspondent à des index recalculés sur une gamme 0-255, contrainte imposée par le logiciel IDRISI pour l'analyse multicritère de type MCE (Multi Critéria Evaluation).

L'application de la formule du calcul de l'indice global de vulnérabilité donne des valeurs comprises entre 0 et 4 (0 ou 255) correspondant respectivement à la configuration de terrain la moins vulnérable et la plus vulnérable.

Le calcul de l'indice global de vulnérabilité peut être effectué de façon automatique avec un logiciel de SIG de type IDRISI / VERTICAL MAPPER, à partir des 4 cartes de base des critères R, I, S, K.

Des tests ont été effectués pour cinq situations différentes :

- Cas 1 : $0.2 K + 0.1 R + 0.4 I + 0.1 S + 0.2 E$
- Cas 2 : $0.2 K + 0.1 R + 0.3 I + 0.1 S + 0.3 E$
- Cas 3 : $0.2 K + 0.2 R + 0.2 I + 0.2 S + 0.2 E$
- Cas 4 : $0.3 K + 0.1 R + 0.5 I + 0.1 S$
- Cas 5 : $0.25 K + 0.25 R + 0.25 I + 0.25 S$

Pour les trois premiers cas, une carte pour le critère E a été prise en compte; les classes E sont distinguées en fonction de l'existence ou non d'une morphologie karstique marquée, avec des dolines, des vallées sèches, des avens ou gouffres.

E₀ : influence nulle sur la vulnérabilité : cette classe regroupe toutes les zones du bassin qui ne présentent pas de modelé karstique.

E₁ : influence faible sur la vulnérabilité : cette classe regroupe toutes les zones du bassin qui ne présentent pas de modelé karstique net.

E₂ : influence moyenne sur la vulnérabilité : cette classe regroupe les morphologies karstiques de type lapiez et les vallées sèches avec leur bassin versant associé. Ce type de morphologies bien que n'étant pas en relation directe avec le réservoir aquifère, peuvent concentrer les écoulements qui finiront par s'infiltrer avec un délai plus ou moins important.

E₃ : influence forte sur la vulnérabilité : cette classe prend en compte les dolines⁵ et les alignements de dolines (ouvalas⁶) qui constituent des zones dépressionnaires

⁵ Dépression fermée en milieu calcaire dont le diamètre peut varier de quelques mètres à un kilomètre, et la profondeur de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres.

qui concentrent les écoulements qui rejoindront ensuite le réservoir aquifère par infiltration plus ou moins différée dans le temps.

Les dolines ont été cartographiées en définissant une zone de « sécurité » de 50 m autour.

E₄ : influence très forte sur la vulnérabilité : cette classe prend en compte les avens qui peuvent, de part leur structure verticale, constituer des points d'entrée privilégiés de polluants potentiels vers le réservoir.

Ces différentes situations de pondération seront discutées dans le cadre des exemples d'application.

3.6. IDENTIFICATION DES CLASSES DE VULNÉRABILITÉ

Toutes les alternatives des critères ont été classées en 5 catégories indexées de 0 à 4, du moins au plus vulnérable. La classe intermédiaire 2 correspondant aux caractéristiques moyennement vulnérables de chaque critère.

Dans la même logique, l'indice global de vulnérabilité (I_g) obtenu en chaque pixel de la zone d'étude est divisé en 5 classes (0 à 4) allant du moins au plus vulnérable.

| Classes de l' I _g * | Classes de Vulnérabilité | |
|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 0 – 50 | 0 | Vulnérabilité très faible |
| 51 – 101 | 1 | Vulnérabilité faible |
| 102 – 152 | 2 | Vulnérabilité moyenne |
| 153 – 203 | 3 | Vulnérabilité forte |
| 204 – 255 | 4 | Vulnérabilité très forte |

* Résultats obtenus avec le module MCE (analyse multicritère) du logiciel IDRISI

Les 5 classes ainsi obtenues traduisent le degré de vulnérabilité en chaque point de la zone d'étude.

⁶ Large dépression fermée en milieu calcaire formée de la coalescence de plusieurs dolines.

4. Evaluation du risque

L'évaluation du risque est une étape dans le processus de protection des ressources en eau souterraine et plus particulièrement de l'établissement des périmètres de protection. Le risque, terme utilisé pour mettre en évidence la probabilité d'une contamination possible résultant d'un événement aléatoire, constitue l'origine possible d'une contamination liée à une activité donnée. Combinée à la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, caractérisant la sensibilité du milieu souterrain à la contamination, elle permet de déterminer les conséquences potentielles d'une contamination.

L'évaluation du risque est un processus d'évaluation de l'impact potentiel d'un agent chimique, biologique ou physique sur l'eau souterraine. Elle identifie les risques potentiels ou existants ainsi que les voies d'écoulement exposées. Les points suivants sont à prendre en considération : - la probabilité ou vraisemblance de l'impact, - l'intensité d'un impact potentiel sur les eaux souterraines et - la sensibilité de l'eau souterraine.

L'évaluation du risque dans le cadre de la protection des eaux souterraines karstiques, nécessite :

- identification des risques potentiels ;
- analyse de l'impact potentiel des risques sur les eaux souterraines (concentration et quantité de contaminants) ;
- information sur les caractéristiques hydrogéologiques des matériaux géologiques qui peuvent influencer le transfert et l'atténuation des contaminants : vulnérabilité des eaux souterraines ;
- information sur la valeur des eaux souterraines. Les eaux karstiques sont considérées comme avoir une haute valeur.

Les risques peuvent être répartis en plusieurs catégories, selon deux niveaux :

| N° | Niveau I Catégorie des risques | Niveau II Catégorie des risques |
|----|--------------------------------|--|
| 1 | Infrastructure | Eaux usées Déchets municipaux Huiles et essences Transport et trafic Zones récréatives Divers |
| 2 | Activités industrielles | Mines (en cours d'exploitation et post-exploitation) Excavation Exploitation de gaz et pétrole Industries (hors mines) Stations électriques Stockage industriel |

| | | |
|---|------------------------|-------------------------|
| | | Traitement d'eaux usées |
| 3 | Animaux et agriculture | Bétail Agriculture |

Les risques peuvent cartographiés en adoptant des symboles particuliers pour les différentes catégories de risque, hiérarchisés.

L'objet de cette étude n'étant pas focalisé sur la cartographie du risque, mais sur la définition d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité, le lecteur peut se reporter notamment aux chapitres concernés dans le rapport de l'Action COST 620.

Les cartes de vulnérabilité et des risques ainsi sont des outils indispensables pour établir les périmètres de protection et leurs servitudes associées.

5. Application de la méthode aux systèmes karstiques d’Arcier et d’Uzelle

5.1. INTRODUCTION

La méthodologie de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques a été appliquée à deux cas, (i) le bassin d’alimentation de la source d’Arcier et (ii) le bassin d’alimentation de la source Crépôt à Uzelle. Les différents indices ont été cartographiés pour les 4 à 5 indices de la méthode RISK(E), en ayant recours à des documents de type carte géologique, carte topographique, données existantes d’étude spécifique (ex. carte des sols pour le bassin d’Arcier), une interprétation des données géologiques et hydrogéologiques et à partir de visites de terrain (validation de la classification des sols, acquisition de mesures complémentaires notamment en terme d’épaisseur des sols).

Chaque site est présenté, du point de vue géographique, géologique et hydrogéologique au paragraphe 5.3. De plus les cartes par critère sont présentées pour chacun des sites, avec une explication sur l’attribution des paramètres en 5 classes. La ou les cartes de vulnérabilité résultantes sont commentées. La procédure ne prévoit pas de définir ou de proposer des cartes de périmètres de protection à partir des cartes de vulnérabilité, néanmoins un commentaire général sur les cartes de vulnérabilité en comparaison des périmètres de protection peut être formulé, sans remettre en cause les périmètres de protection existants.

5.2. PROCÉDURES DE TRAITEMENT DES DONNÉES

L’application de la méthodologie, dont les principes ont été exposés au chapitre 3.4, nécessite un traitement des données faisant appel à plusieurs logiciels de SIG. La liste des principaux traitements appliqués sur les deux cas d’étude sont ainsi présentés ci-dessous.

5.2.1. Démarche générale

| | Traitement | Logiciel | Fichiers en sortie |
|----|---|--------------------|---------------------|
| 1 | Cartographie de chaque critère en fonction des données disponibles, des observations et des mesures de terrain. | | |
| 2 | Numérisation des contours de chaque critère et valorisation des polygones. | MAPINFO | Vecteur MAPINFO |
| 3 | Exportation selon le format d'échange MAPINFO | MAPINFO | Fichiers MID/MIF |
| 4 | Importation des fichiers MID/MIF (file/import/software specific formats/mifidris). Cet ordre permet d'importer aussi bien des polygones que des points (importation de la localisation des pertes par exemple). IDRISI édite aussi lors de cette étape un "fichier valeur" de type access (*.mbd) qui numérote tous les polygones et leur attribue la valeur correspondante du critère. | IDRISI | Vecteur IDRISI |
| 5 | Définition de l'extension de l'image raster du secteur d'étude : origine et extrémité de la zone, nombre de lignes et de colonnes (data entry/initial) | IDRISI | Raster IDRISI |
| 6 | Transformation du fichier vecteur en un fichier raster (reformat/raster-vector conversion/polyras) | IDRISI | Raster IDRISI |
| 7 | Écriture du "fichier valeur" en format excel, puis en format prn | ACCESS et EXCEL | |
| 8 | Lecture du fichier prn et enregistrement en un fichier de type *.avl, format utilisé par IDRISI pour les traitements (data entry/edit) | IDRISI | Type avl IDRISI |
| 9 | Affectation des valeurs du critère à chaque pixel du fichier raster IDRISI (analyse/database query/assign) | IDRISI | Raster IDRISI |
| 10 | Transcription des valeurs de chaque critère (de 0 à 4) sur une échelle commune de valeurs s'étendant de 0 à 255 (analysis/decision support/fuzzy) | IDRISI | Raster IDRISI |
| 11 | Évaluation de l'indice de vulnérabilité en affectant à chaque critère un poids et en les combinant (analysis/decision support/mce) | IDRISI | Raster IDRISI |
| 12 | Écriture des fichiers vers le format Mapinfo qui permet la visualisation des résultats sur un fond géographique : vectorisation du fichier raster (reformat/raster-vector conversion/polyvec) | IDRISI | Vecteur IDRISI |
| 13 | Exportation au format MID/MIF (file/export/software specific formats/mifidris) | IDRISI | Fichiers MID/MIF |
| 14 | Remplacement de l'entête du fichier MIF par celle contenant le bon système de coordonnées. | WORDPAD | Fichier *.txt |
| 15 | Importation du fichier résultat de l'évaluation multicritère dans MAPINFO et création des fichiers format mapinfo (*.tab, *.map...) | MAPINFO | Vecteur MAPINFO |
| 16 | Analyse thématique et superposition à un fond de carte IGN | MAPINFO | Vecteur MAPINFO |

5.2.2. Traitement du Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le logiciel IDRISI permet de traiter les MNT, de calculer les pentes et de classer les pentes en différentes classes. Les étapes sont les suivantes :

| | | | |
|---|---|--------|-----------------------|
| 1 | Importation et création d'un fichier vecteur du MNT (file/import/software specific format/XYZIDRISI) | IDRISI | Vecteur IDRISI |
| 2 | Création d'un fichier TIN (triangulated irregular network) (data entry/surface interpolation/TIN interpolation/TIN) | IDRISI | Fichier TIN IDRISI |
| 3 | Création d'un fichier raster de la surface à partir du fichier TIN et du fichier vecteur de la surface (data entry/surface interpolation/TIN interpolation/TINSURF) | IDRISI | Fichier raster IDRISI |
| 4 | Calcul des pentes (analysis/surface analysis/topographic variables/slope) | IDRISI | Fichier raster IDRISI |
| 5 | Répartition en 4 classes les valeurs de pentes (analysis/database query/reclass) | IDRISI | Fichier raster IDRISI |

5.3. CAS D'ÉTUDE – SYSTÈME KARSTIQUE DE LA SOURCE D'ARCIER

5.3.1. Contexte géologique et hydrogéologique

Le bassin d'alimentation de la source d'Arcier s'étend, immédiatement à l'Est de la ville de Besançon, sur environ 110 km². Il est constitué d'une vaste plaine qui se tient à environ 400 à 450 m d'altitude ; on dénommera cette plaine, la cuvette de Saône-Nancray. Cette plaine est bordée au SE par un relief orienté SW/NE qui culmine à 700 m d'altitude. Au NW, elle est bordée par un autre relief qui culmine à 600 m d'altitude et qui domine directement la vallée du Doubs et la ville de Besançon. On verra ci-dessous que ce relief rend compte assez exactement de la structure géologique.

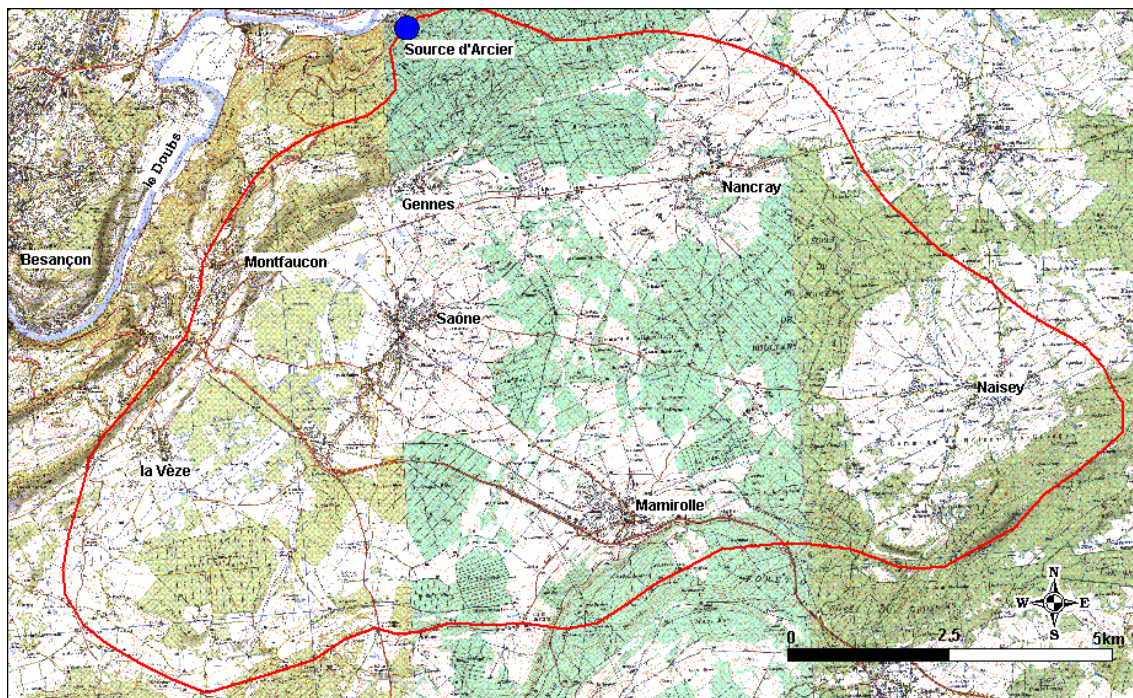


Illustration 22 - Situation géographique du bassin d'alimentation de la source d'Arcier (25) (© IGN).

Les formations constitutives du bassin de la source d'Arcier, comme celles de tout le massif jurassien, sont de nature calcaire et karstifiée avec seulement quelques niveaux marneux.

L'exutoire du bassin, la source d'Arcier, est situé au niveau de la vallée du Doubs, à l'extrémité NW du bassin d'alimentation à une altitude de 300 m.

5.3.2. Structure géologique

Le système géologique de la source karstique d'Arcier résulte d'une structure géologique assez particulière. Avant de décrire cette structure, il convient d'exposer la succession des formations géologiques des environs de Besançon.

On distingue de bas en haut, c'est à dire des formations les plus anciennes aux plus récentes :

- Le Lias constitué de marnes et d'argiles ; ce sont les formations les plus anciennes que l'on rencontre à l'affleurement dans le Jura bisontin (leur substratum, les formations du Trias, n'affleure jamais dans la zone considérée ici) ;
- Le Jurassique moyen (Bajocien et Bathonien) constitué de calcaires le plus souvent massifs ; leur puissance totale atteint 150 à 200 m ;
- Le Jurassique supérieur marneux (Callovien et Oxfordien inférieur) ; on y rencontre des niveaux de marnes et des niveaux de calcaires marneux ; la puissance totale de cet ensemble atteint environ 100 m ;
- Le Jurassique supérieur calcaire (Oxfordien supérieur) ; il est constitué de calcaires massifs mais avec un petit niveau marneux dans sa partie moyenne ; sa puissance totale atteint environ 150 m ;
- Le Kimméridgien ; il est constitué de calcaires compacts associés à des calcaires marneux ; c'est la formation la plus récente qui affleure dans le Jura bisontin en dehors des formations superficielles (alluvions et Plio-quadernaire).

Ces formations sont disposées, dans le bassin de la source d'Arcier, globalement en une cuvette synclinale (illustration 23). Le fond de la cuvette est occupé par le Jurassique supérieur calcaire affleurant qui repose, en succession normale et à peu près horizontale, d'abord sur le Jurassique supérieur marneux puis sur le Jurassique moyen calcaire puis sur le Lias.

La cuvette synclinale est bordée au NW et au SE par des anticlinaux faillés et chevauchant constitués de Jurassique moyen calcaire à cœur de Lias et dénommés faisceaux :

- sur la bordure SE du bassin, le faisceau de Mamirolle qui chevauche la cuvette vers le NW par une bande tectonisée,
- sur la bordure NW, le faisceau bisontin qui chevauche des formations du Kimméridgien vers le NW c'est-à-dire à l'extérieur de la cuvette.
- Par rapport à la disposition du relief évoquée ci-dessus, la cuvette synclinale est occupée par la plaine dénommée cuvette de Saône-Nancray et les deux faisceaux

par les deux bandes de relief bordiers, le relief du SE par le faisceau de Mamirolle et le relief du NW par le faisceau bisontin (illustration 24).

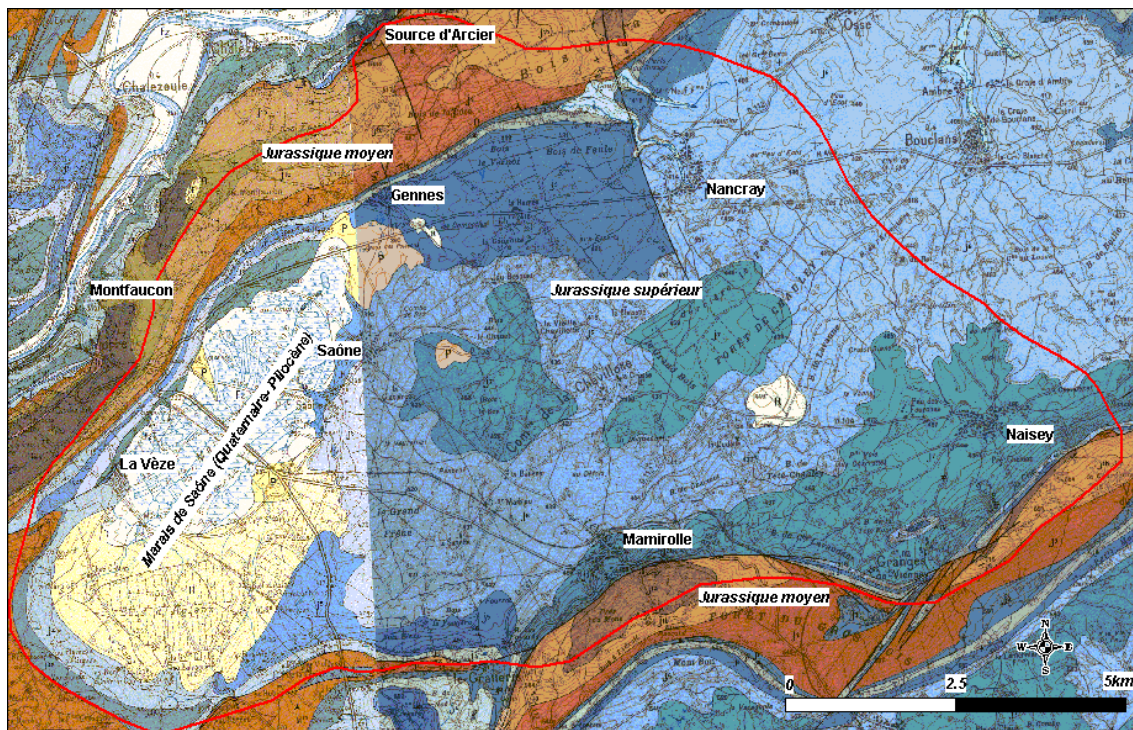


Illustration 23 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000 (édition brgm) au niveau du bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

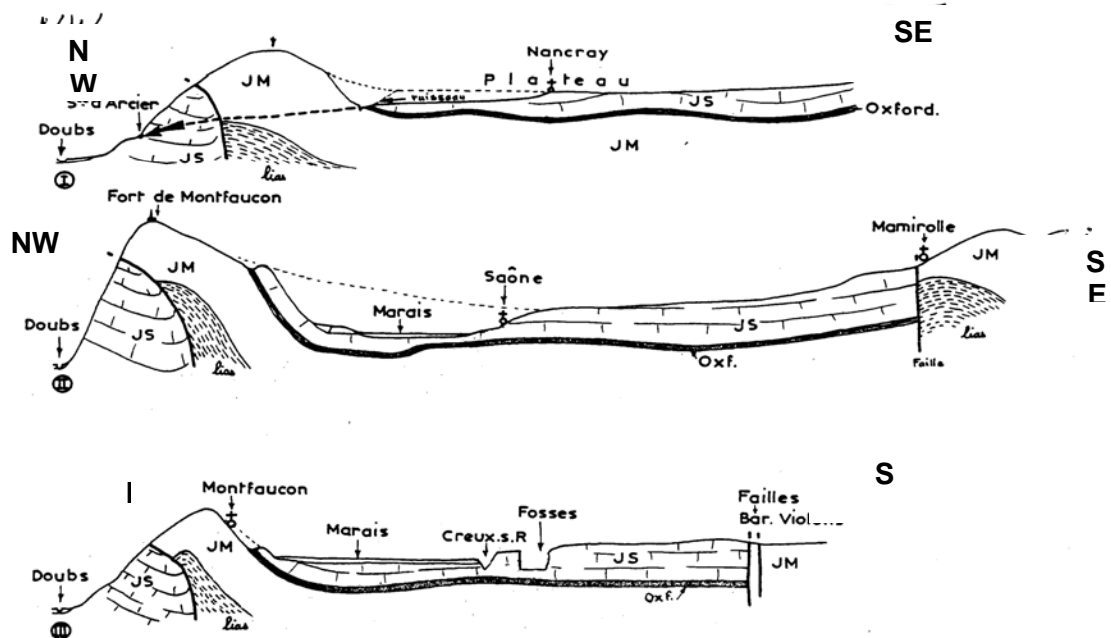


Illustration 24 - Coupes géologiques transverses au bassin d'alimentation de la source d'Arcier (d'après Dreyfuss et Chave, 1971) (JM : Jurassique moyen, JS : Jurassique supérieur, Ox f: Oxfordien).

5.3.3. Hydrogéologie

L'hydrogéologie du bassin d'alimentation de la source d'Arcier dépend directement de la succession des couches géologiques et de leur structure (ci-dessus en 5.3.2). Par ailleurs, les nombreuses expériences de traçage réalisées ont permis de mieux connaître l'hydrogéologie et le cheminement des eaux de ce bassin (« Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche-Comté », Annales scientifiques de l'Université de Besançon, géologie, mémoire n° 2, 1987 et « Circulations souterraines reconnues par traçage, inventaire DIREN Franche-Comté », 2003, CDROM sous ACCESS).

Globalement, il y a deux aquifères karstiques superposés,

- l'aquifère supérieur dans le Jurassique supérieur calcaire (Oxfordien supérieur),
- l'aquifère inférieur dans les calcaires du Jurassique moyen (Callovien, Bathonien et Bajocien).

Ces deux aquifères sont séparés par le niveau peu perméable du Jurassique supérieur marneux (Oxfordien inférieur).

Du fait de la tectonique, de nombreuses communications existent entre ces deux aquifères malgré les formations marneuses intermédiaires.

Enfin les argiles du Lias constituent le substratum imperméable de ces ensembles.

Les précipitations sur la cuvette de Saône-Nancray ruissellent ou s'infiltrent dans le Jurassique supérieur calcaire affleurant. Plus précisément, les précipitations s'infiltrent essentiellement dans les zones de dolines qui couvrent des surfaces importantes (illustration 25) et rejoignent alors l'aquifère karstique du Jurassique supérieur calcaire dont la profondeur de la surface piézométrique en basses ou moyennes eaux n'est pas précisément connue.

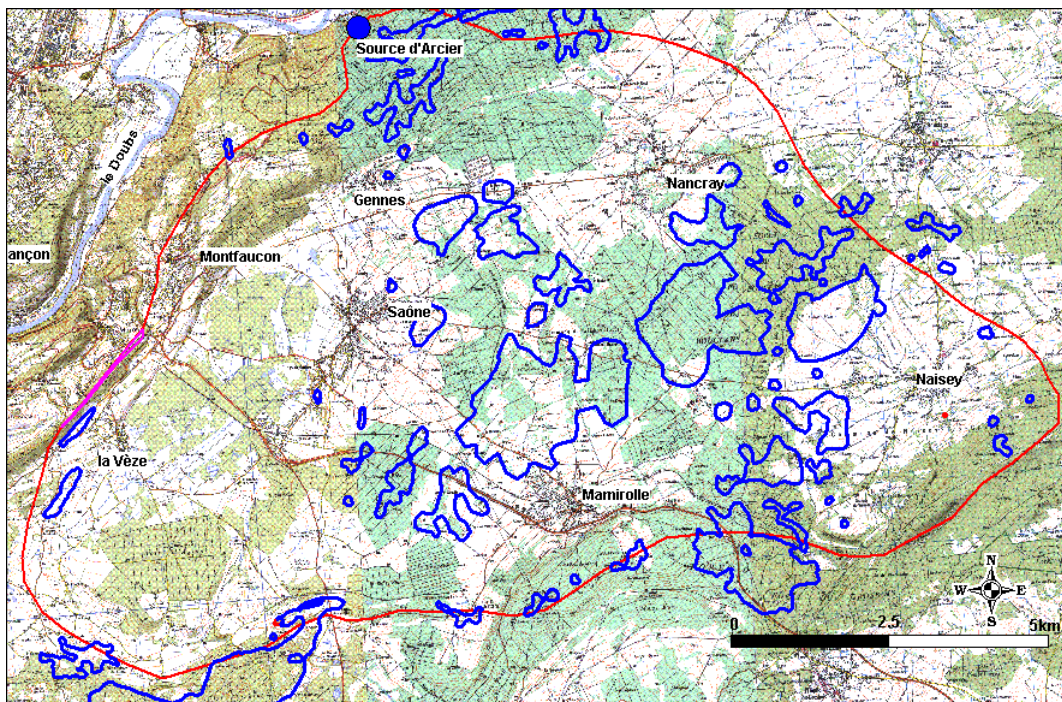


Illustration 25 - Répartition des dolines et zones de dolines à l'échelle du bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

Trois zones se distinguent cependant (illustration 26) :

- Nancray et ses environs où les précipitations qui s'infiltrent sont arrêtées à faible profondeur par quelques niveaux marneux (base de l'aquifère supérieur) ; il se forme alors des nappes locales peu profondes (présence de puits avec pompes à roues dans le bourg de Nancray) qui donnent naissance à de petites sources (anciens captages dans le bourg de Nancray, abreuvoir sur source au Sud du bourg) dont le regroupement donne naissance au ruisseau de Nancray et au ruisseau du Moulin ; ces deux ruisseaux présentent un écoulement qui semble à peu près permanent sur le Jurassique supérieur marneux qui affleure au Nord de Nancray (bordure N de la structure synclinale) et finissent par se perdre dans des

gouffres dès leur arrivée sur les affleurement de Jurassique moyen (ils rejoignent ainsi directement l'aquifère du Jurassique moyen) ;

- La zone de la Baraque des violons et de la Vèze où, du fait du relèvement des couches (bordure SW de la cuvette synclinale), le Jurassique supérieur marneux affleure et apparaissent alors de très petites sources et des écoulements qui semblent permanents ; dès qu'ils arrivent sur les affleurements de Jurassique moyen, ces écoulements se perdent dans de grosses dolines d'où ils atteignent directement l'aquifère du Jurassique (moyen) ;
- La zone du marais de Saône qui est située dans la partie la plus basse de la cuvette synclinale et qui est occupée par des formations sablo-argileuses plio-quaternaires, d'où la présence du marais ; les eaux du marais se perdent dans des gouffres dès qu'elles quittent les formations plio-quaternaires et arrivent sur les formations du Jurassique supérieur calcaire (gouffres du Creux sous Roche et quelques autres).

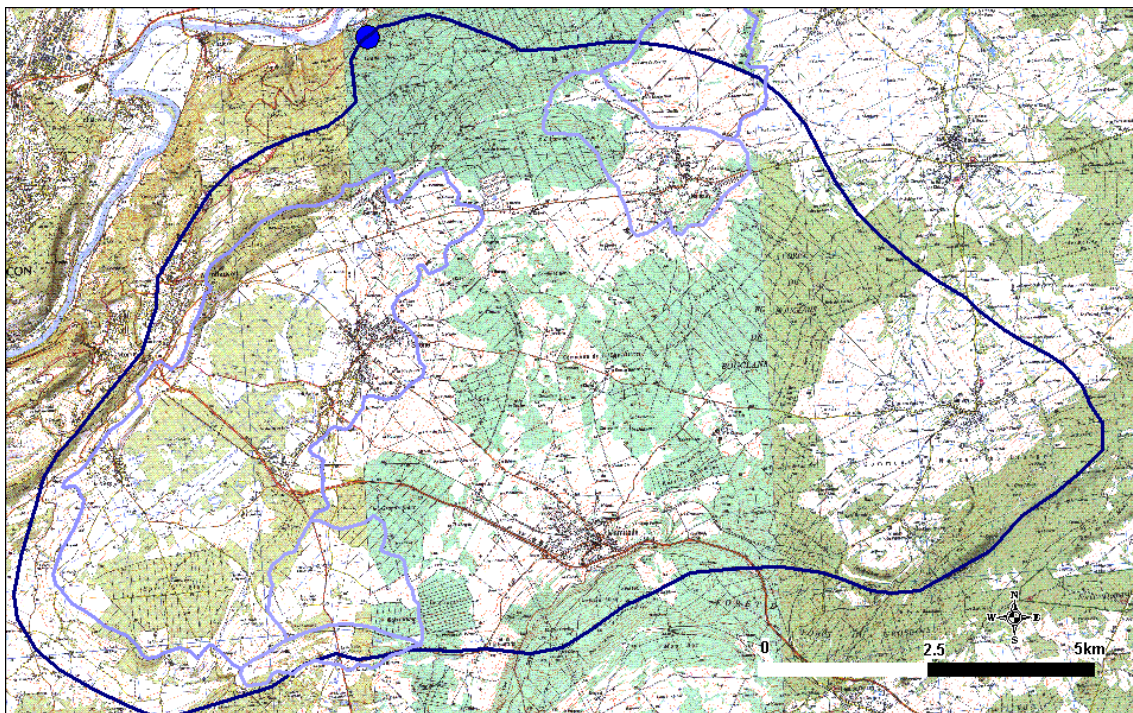


Illustration 26 - Bassins versants de surface sur le bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

Que deviennent les eaux de l'aquifère du Jurassique supérieur (alimenté, rappelons le, par l'infiltration des précipitations sur les affleurements, notamment dans les zones de

dolines, et par les pertes du marais de Saône) ? Il est vraisemblable qu'elles rejoignent l'aquifère inférieur par les failles du faisceau de Mamirolle ou d'autres. En crue karstique, le marais est totalement inondé et les gouffres, qui fonctionnent en pertes la plus grande partie de l'année, fonctionnent alors en émission : le niveau piézométrique de l'aquifère s'établit alors, dans le marais de Saône, au-dessus du niveau du sol. Ces périodes, qui peuvent durer quelques semaines à plus d'un mois, se terminent lorsque le niveau piézométrique baissant (l'aquifère supérieur se vide toujours, probablement par les grandes failles comme celles du faisceau de Mamirolle) il repasse sous la surface du marais (les gouffres recommencent alors à jouer en perte) (illustration 27).

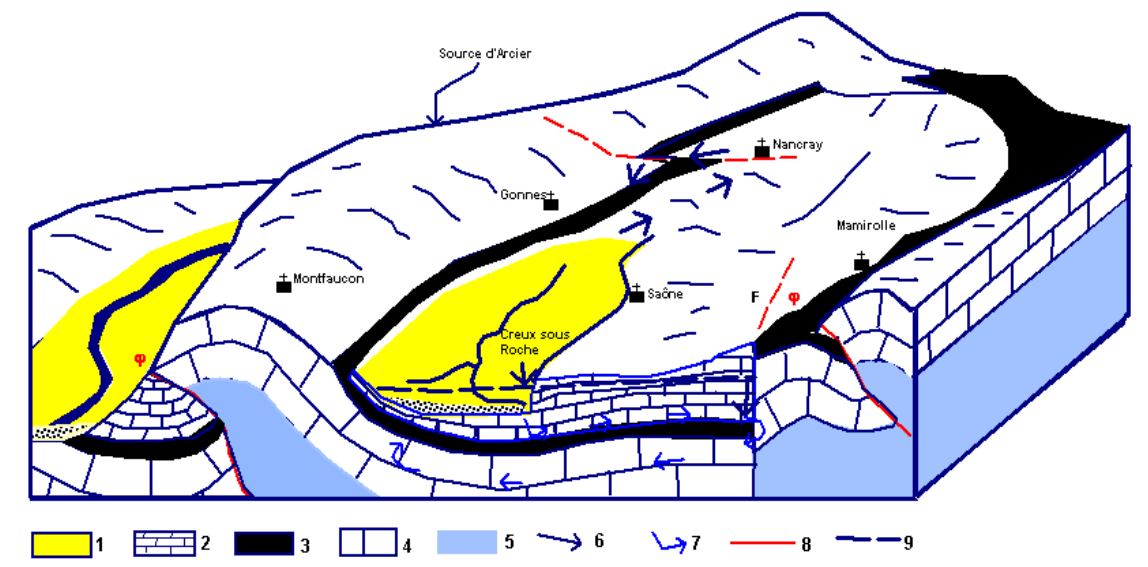


Illustration 27 - Fonctionnement hydrogéologique du bassin d'alimentation de la source d'Arcier (d'après Mettetal, DIREN SRAE, 1985).

Légende : 1 : Formations récentes (alluvions de la vallée du Doubs et Plio-quaternaire du marais de Saône ; 2 : Jurassique supérieur : calcaire ; 3 : Jurassique supérieur : marneux ; 4 : Jurassique moyen calcaire ; 5 : Lias marneux ; 6 : écoulements en hautes eaux ; 7 : écoulements en Basses eaux ; 8 : faille et 9 : niveau piézométrique en hautes eaux.

L'aquifère inférieur est alimenté :

- par les précipitations sur les affleurements de Jurassique moyen des bordures SE (faisceau de Mamirolle) et NW (faisceau bisontin) du bassin,
- par les pertes des ruisseaux de Nancray et du Moulin et par celles de la zone de la Baraque des Violons et de la Vèze,
- par les failles de Mamirolles ou d'autres qui mettent en communication l'aquifère supérieur avec l'inférieur.

Comment les eaux de l'aquifère inférieur atteignent-elles l'exutoire de la source d'Arcier ? Les deux faisceaux bordiers du SE et du NW, de part leur structure à cœur de Lias marneux empêchent l'eau des deux aquifères de la cuvette synclinale d'en sortir, notamment vers le NW. Or la source d'Arcier, exutoire du système, se trouve pourtant au NW et en dehors de la structure synclinale. Il est vraisemblable qu'il y ait, soit un ensellement du toit du Lias marneux permettant à l'aquifère inférieur de déborder vers le NW et de venir au jour à la source d'Arcier à 300 m d'altitude, soit une faille transversale (la faille de Nancray ?) qui jouerait le même rôle.

La structure de la cuvette synclinale de Nancray-Saône se prolonge vers le NE et vers le SW. Dans ces deux directions, le bassin de la source d'Arcier est limité par une ligne de partage des eaux souterraines :

- au-delà vers le NE, les eaux des deux aquifères, notamment de la cuvette de Champlive-Bouclans, s'écoulent, soit vers le NW pour ressortir dans la vallée du Doubs mais à la source de Chevanne, soit vers le Nord pour ressortir aux sources de la vallée du Cusancin,
- au-delà vers le SW, les eaux des deux aquifères s'écoulent vers la vallée de la Loue où elles ressortent par des sources (il est possible cependant que cette ligne de partage des eaux passe sous le marais de Saône car ses eaux, qui se perdent dans les gouffres, peuvent ressortir aussi dans la vallée de la Loue).

5.3.4. Caractérisation des critères

Les zones de forêt n'ont pas fait l'objet de la cartographie ; ces zones dans le cadre de la procédure des périmètres de protection peuvent faire l'objet de recommandations concernant l'usage de produits phytosanitaires, de traitements du bois stocké.

a. Nature de la roche aquifère

A partir de la carte géologique et de la nature lithologique des formations aquifères, deux classes ont été distinguées à l'échelle du bassin d'alimentation de la source d'Arcier, à savoir :

- (i) la classe 2 (vulnérabilité moyenne) pour les formations du Jurassique supérieur
- (ii) la classe 3 (vulnérabilité forte) pour les formations du Jurassique moyen.

Le Jurassique moyen est constitué de calcaires massifs, karstifiés ; cette définition s'apparente à la définition de la classe 2.

Le Jurassique supérieur est constitué d'une part de formations marneuses avec des niveaux calcaires intercalés et d'autre part de calcaires massifs avec de petits niveaux marneux dans sa partie moyenne. Ces caractéristiques correspondent à la classe 2 de la méthode RISK.

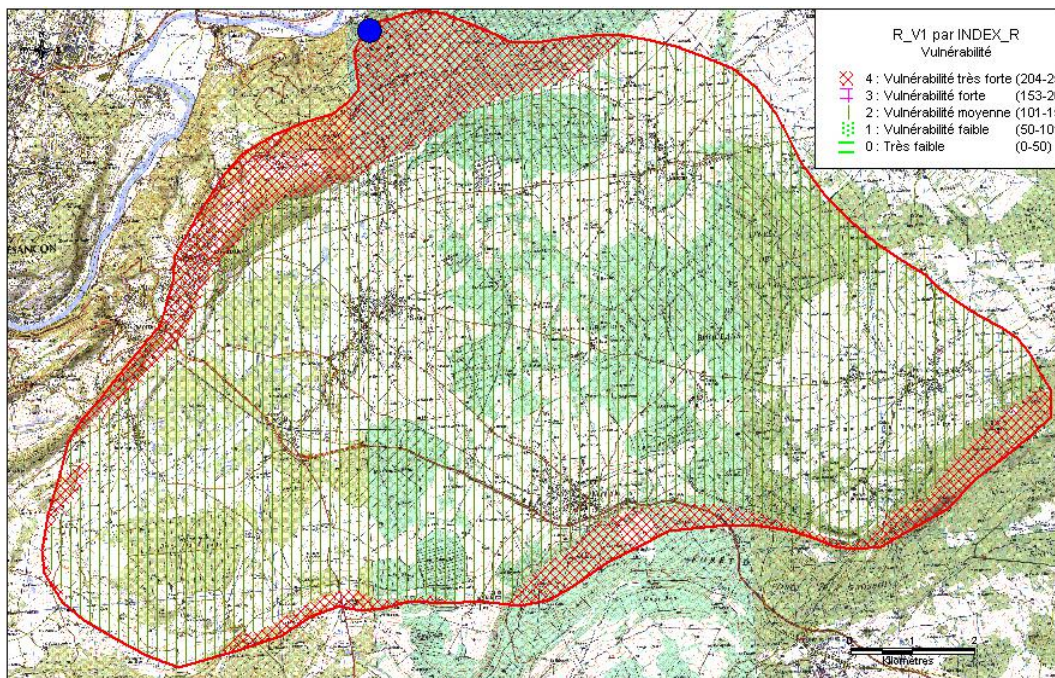


Illustration 28 - Carte du critère R pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

b. Conditions d'infiltration

La carte du critère I « conditions d'infiltration » a été établie d'une part à l'aide du modèle numérique de terrain de la zone d'étude (illustration 29) et d'autre part en intégrant les objets de type pertes, dolines et vallées sèches selon la définition du critère. Les classes de pente selon la définition des classes de ce critère ont été effectuées à l'aide des logiciels IDRISI.

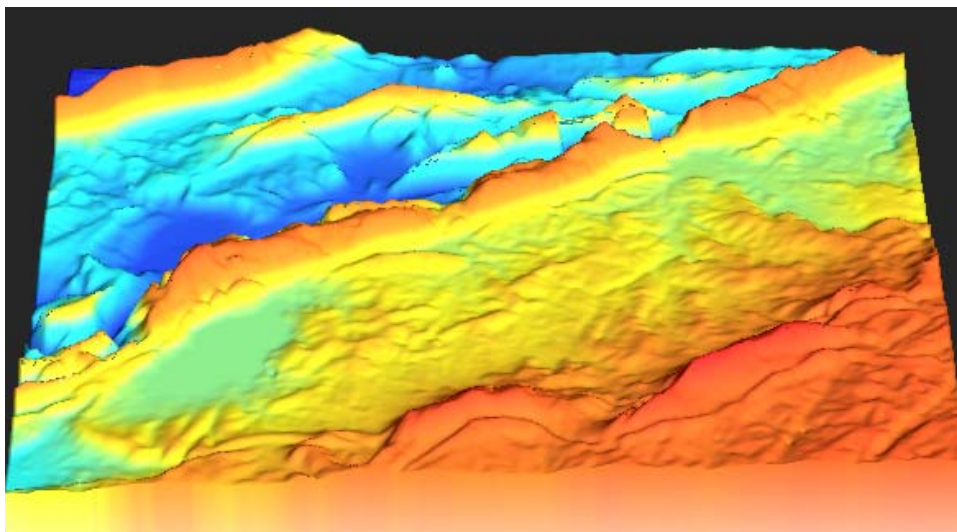


Illustration 29 - Modèle numérique de terrain du bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

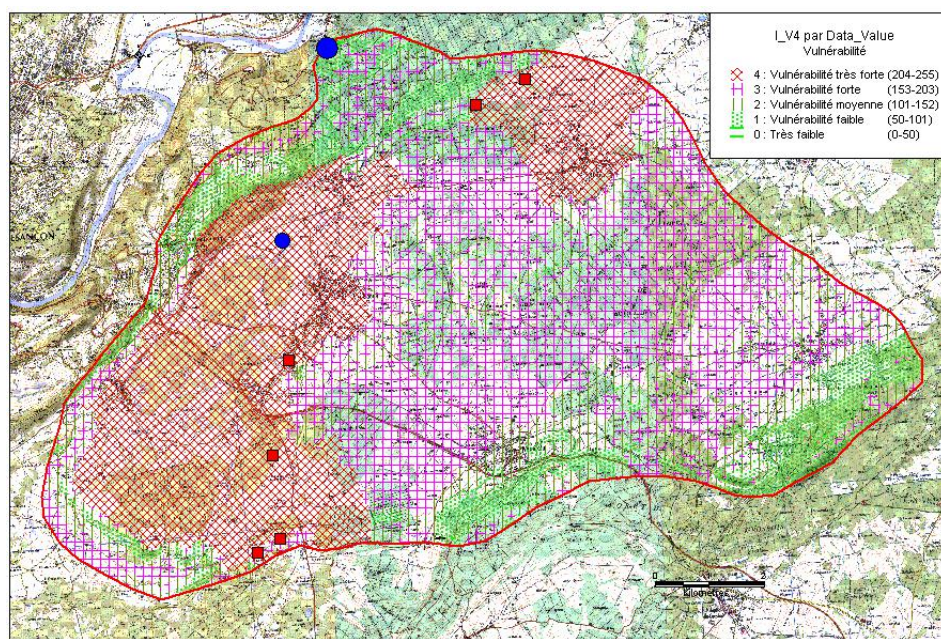


Illustration 30 - Carte du critère I du bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

Quatre classes de 1 à 4 sont présentes sur la carte du critère I (illustration 30). Les zones de vulnérabilité les plus fortes vis à vis de l'infiltration sont notamment les bassins versants des principales pertes, comprenant particulièrement le marais de Saône. Les vulnérabilités les plus faibles avec les classes 1 et 2 se trouvent sur les bords du bassin d'alimentation là où les pentes sont les plus fortes (reliefs marqués du Jurassique moyen). Les pertes de vulnérabilité très forte sont localisées avec des carrés rouges. Les zones de dolines sont en classe 3 et constituent l'essentiel de la partie centrale du bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

c. Sol – couverture protectrice

Carte du sol –couverture protectrice a été établie en considérant d'une part l'étude menée par le GRAP sur le bassin d'alimentation de la source d'Arcier et d'autre part par des vérifications et des mesures ponctuelles sur le terrain (3 jours de terrain, quelques 50 points visités et 50 mesures d'épaisseur à la tarière manuelle).

A partir de la typologie des sols de l'étude du GRAP (2003), en considérant la texture, la pierrosité et l'ordre de grandeur des épaisseurs de sol, une traduction dans les classes de la méthode RISK a été effectuée. Cette traduction tient compte des observations de terrain (illustration 16 et illustration 31 et 32).

Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques

| Type de sol | Texture | Texture ¹ : argile / 2 : limon / 3 : sable | Pierrosité | Pierrosité 1 (0-15%) ; 2(15- 60%) ; (>60%) | Nature du sol ① | Profondeur (cm) ② | Classe S ③ |
|--|--|---|--|--|--------------------|----------------------|---------------|
| 1 : Aéré Profond de Plateau | Limoneuse, limono- argileuse | 1/2 | Non | 1 | 1 | >45 | S2 |
| 1rc : Aéré Profond de Plateau | Limoneuse, limono- argileuse | 2/1 | Forte à modérée (chailles) | 1 | 1 | >45 | S2 |
| 1' : Aéré Profond de Plateau | Limoneuse | 2 | Non | 1 | 1 | >60 | S2 |
| 1R : Aéré Moyennement Profond de Plateau | Limono- argileuse, argilo- limoneuse | 2/1 | Parfois (calcaire) | 1 | 1 | Env 35 à 45 | S2 |
| 2 : Aéré Profond de Vallée | Limono- argileuse | 2/1 | Non | 1 | 1 | >60 | S2 |
| 5 : Aéré Superficiel de Plateau | Limono- argileuse, argilo- limoneuse parfois calcaire | 2/1 | Moyenne à forte si labour (calcaire) | 1-2 | 1-2 | 20-35 | S3 |

Illustration 31 - Classification des sols selon la méthode RISK à partir des données pédologiques de l'étude réalisée sur la caractérisation des sols et du ruissellement par le GRAP en 2003 pour les sols de type 1 à 5.

| Type de sol | Texture | Texture ¹ : argile / 2 : limon / 3 : sable | Pierrosité | Pierrosité 1 (0-15%) ; 2(15- 60%) ; (>60%) | Nature du sol ① | Profondeur (cm) ② | Classe S ③ |
|--|---|---|----------------------------------|--|--------------------|----------------------|---------------|
| K : Aéré très Superficiel de Plateau | Argilo- limoneuse, limono- argileuse | 1;2 | Forte si labour (calcaire) | 2 | 1-2 | Env 20 | S4 |
| 7 : de versant sur marnes ou calcaires | / | | / | 2 | 2 | < 10 | S4 |
| 8 : Modérément Hydromorphe de Plateau | Limoneuse | 2 | Non | 1 | 1 | >45 | S2 |
| 8rc : Modérément Hydromorphe de Plateau | Limono- argileuse | 2/1 | Forte à modérée (chailles) | 1 | 1 | >45 | S2 |
| 8', 8'rc : Modérément Hydromorphe de Plateau | Limoneuse | 2 | Parfois (chailles) | 1 | 1 | >60 | S2 |
| 8M : Modérément Hydromorphe | Limono- argileuse, argilo- limoneuse | 2/1 | Parfois (calcaire) | 1 | 1 | >45 | S2 |

Illustration 32 - Classification des sols selon la méthode RISK à partir des données pédologiques de l'étude réalisée sur la caractérisation des sols et du ruissellement par le GRAP en 2003 pour les sols de type K à 8.

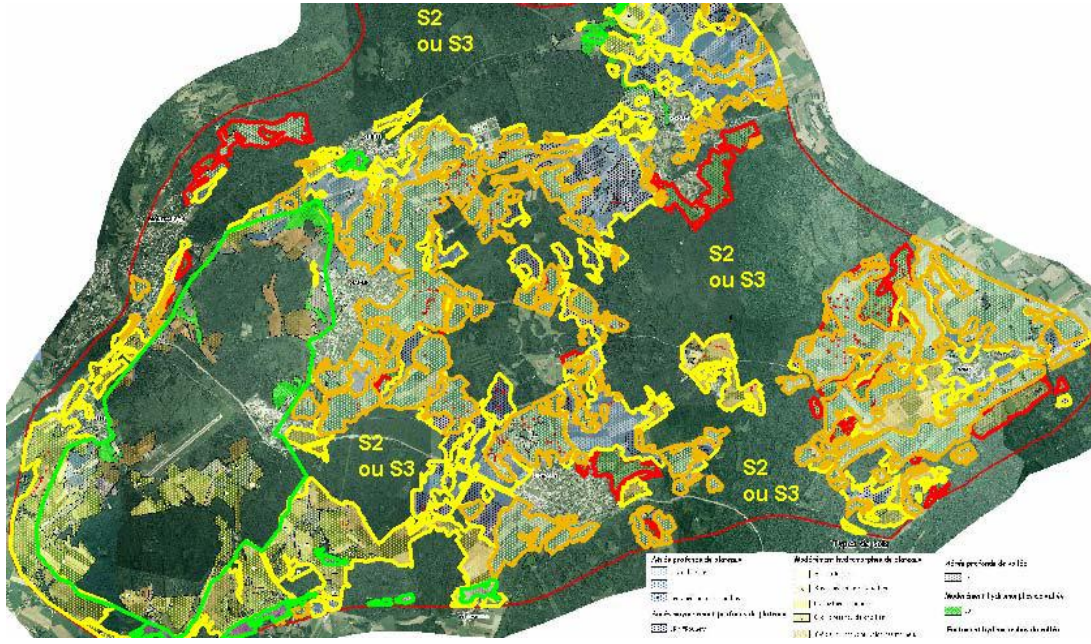


Illustration 33 - Carte de répartition des sols à partir de l'étude du GRAP (2003).

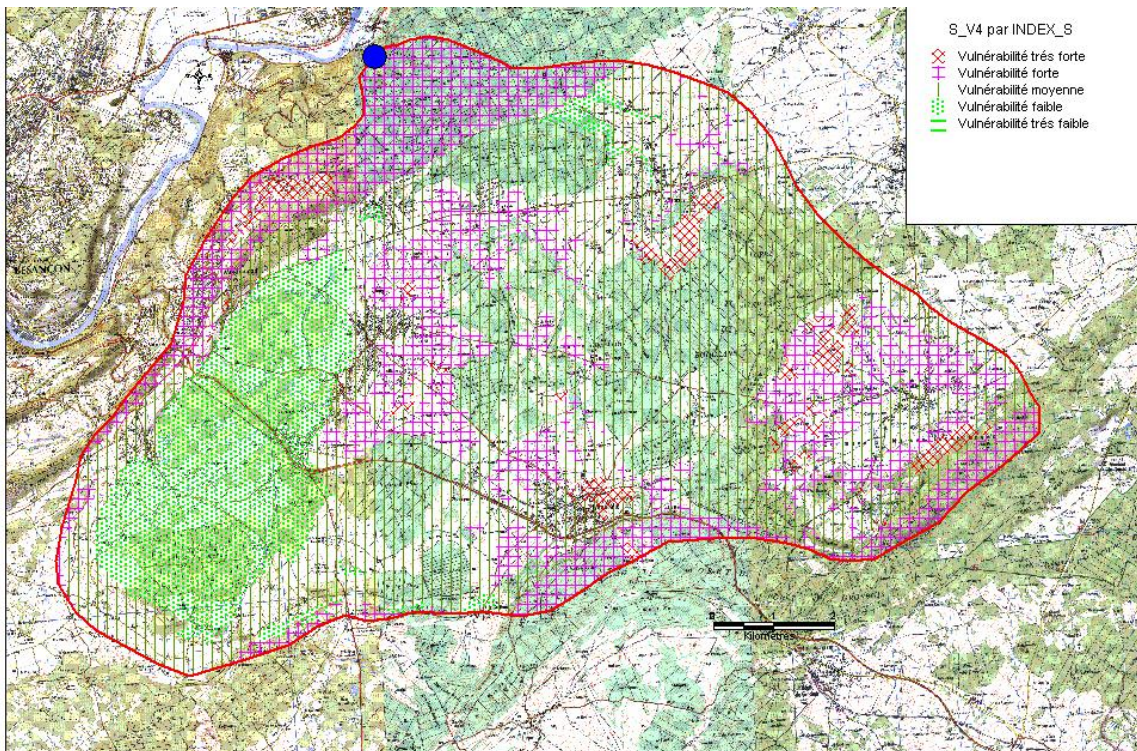


Illustration 34 - Carte du critère S pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

Quatre classes de sol, S1 à S4 sont présentes à l'échelle du bassin d'alimentation de la source d'Arcier, en dehors des zones de forêt. La vulnérabilité faible (S1) correspond aux zones où les sols ou la couverture protectrice sont les plus puissants et protecteurs ; ce sont notamment les zones du marais de Saône et les zones bordières du ruisseau de Nancray. La vulnérabilité moyenne du point de vue de la couverture protectrice des zones en limites du marais de Saône, mais également dans la partie environnante de Nancray, dans la zone périphérique et centrale de la partie SE du bassin (Naisey) ainsi qu'aux environs de Mamirolle (N et SW). La classe S3 est présente au niveau des sols sur les formations du Jurassique moyen (N et S du bassin), ainsi que dans la partie centrale du bassin et l'essentiel des terrains autour de Naisey. Finalement, la classe S4 de vulnérabilité très forte vis-à-vis des sols et de la couverture protectrice est présente en 4 secteurs du bassin d'alimentation : au niveau du plateau de Montfauconn (lieu-dit *La Combe aux Bâtards*), de la zone SE de Nancray (lieux dits *la Combe de Roche* et *Le Peu, Derrière le Peu*), de la zone centrale de Mamirolle et au niveau de quelques zones dans le secteur de Naisey (lieux dits *Cratot Blanc, La Croix de l'Euserole, l'amont de la Combe aux Serpents, au Sud du Pré Chennoz*).

d. Développement de la karstification – critère K

Le système karstique de la source d'Arcier, au vu du comportement de vidange du marais de Saône au Creux sur Roche (vidange en quelques heures), des variations de débit la source d'Arcier lors des crues, et des vitesses de traçage importantes (« Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche-Comté », Annales scientifiques de l'Université de Besançon, géologie, mémoire n°2, 1987) atteignant plus de 300m/h en période de hautes eaux, peut être considéré comme étant caractérisé par un degré de karstification important (K3).

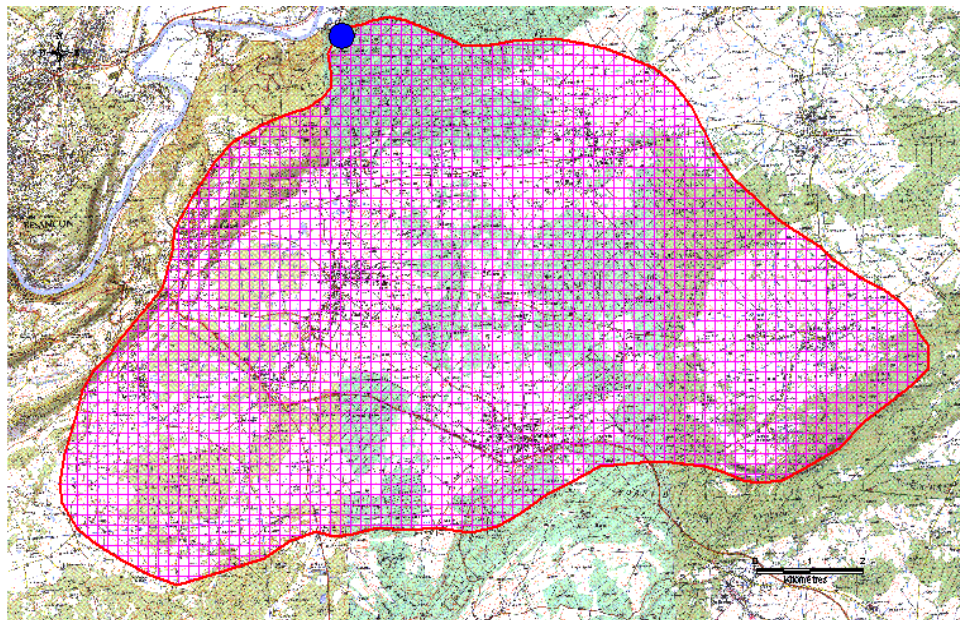


Illustration 35 - Carte du critère K pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

e. Epikarst

La carte de vulnérabilité concernant le critère Epikarst est présentée à titre indicatif, cette carte ayant été utilisée pour comparer les cartes de vulnérabilité résultante entre la méthode RISK et la méthode RISKE. L'attribution des différentes classes a été effectuée à partir d'une part des photos aériennes, de la carte géologique, de la carte topographique IGN et de visites de terrain. Le rôle de l'épikarst comme zone tampon ou retard à l'infiltration d'une contamination mais également avec un effet de concentrer les contaminants est difficilement cartographiable à l'heure actuelle, à l'aide des outils directs ou indirects (méthode géophysique). Ainsi ce sont plutôt des caractéristiques pouvant être qualifiées de « non épikarst » ou de « by pass de l'épikarst » qui sont retenues pour la classification de ce critère E. Ainsi les zones de gouffres, de dolines, de vallées sèches ont été cartographiées et réparties dans les classes E₄ à E₂, le reste de la surface du bassin étant classé en E₁ par défaut, à l'exception de la zone du marais de Sône et du bassin du ruisseau de Nancray avec présence de sédiments plio-quadernaires, classées en E₀ (absence de morphologie karstique).

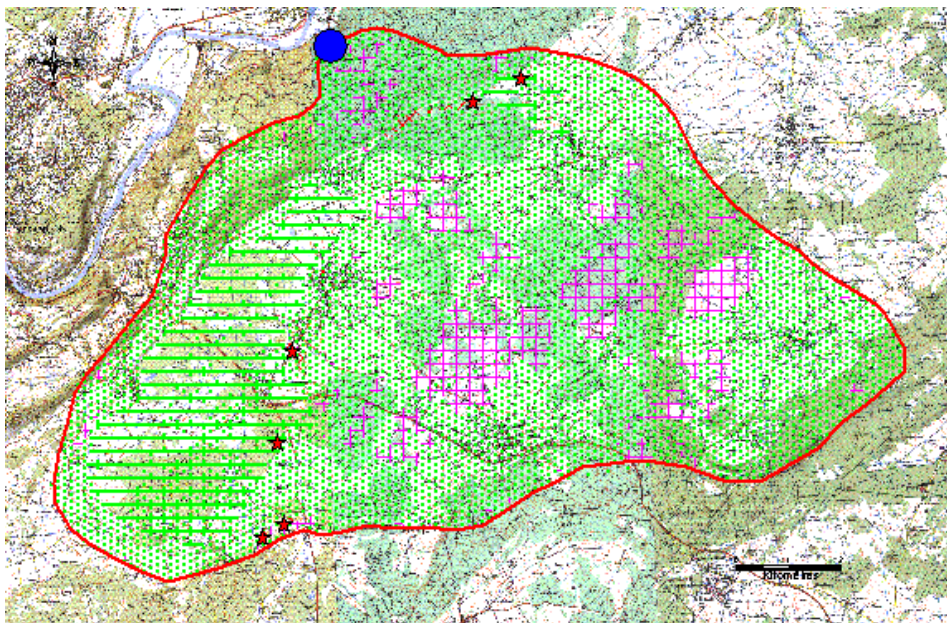


Illustration 36 - Carte du critère E utilisée pour test dans le passage de la méthode RISKE à RISK, pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

5.3.5. Carte de vulnérabilité

A titre de comparaison, 5 cas de pondération différente sont présentés. Parmi ces 5 cas, deux concernent la méthode RISK et trois la méthode RISKE. De plus, deux cas concernent des pondérations identiques pour tous les critères. L'ensemble des cartes figure à l'annexe 2.

Les pondérations des critères diffèrent selon les cas :

- Pondération plus forte pour le critère I et K par rapport à R et S qui ont un caractère de protection plus important que les deux premiers critères nommés.
- Deux cas de pondération plus forte pour les critères I, K et E par rapport à R et S pour la méthode RISKE où le critère Epikarst est différencié.

Les caractéristiques de la carte de vulnérabilité globale du bassin de la source d'Arcier pour le système de pondération suivant : $0,1 R + 0,5 I + 0,1 S + 0,3 K$ sont les suivantes (cas 4, annexe 2) :

- 4 classes de vulnérabilité sont présentes, avec une dominante des classes 3 et 4, vulnérabilité forte à très forte.
- Deux grandes zones de vulnérabilité très forte concernent le secteur du marais de Saône ainsi que le bassin versant du ruisseau de Nancray.
- Les secteurs de vulnérabilité forte correspondent notamment aux zones bordières du bassin ainsi qu'aux zones avec une densité de dolines importantes.
- Les classes de vulnérabilité moyenne et faible sont situées dans le Sud du bassin au Sud de Mamirole et la partie SW du bassin en bordure du marais de Saône.

Pour les cas 1 et 2 (Annexe 2), les cartes de vulnérabilité globale sont dominées par une vulnérabilité forte, respectivement moyenne. Les zones de vulnérabilité forte sont identiques pour les deux cartes correspondant à des zones de dolines avec peu de sol ou un bassin versant d'une perte dans le sud du bassin, peu de sol et la présence des formations du Jurassique moyen.

Une pondération identique pour tous les critères a comme conséquence dans le cadre de la méthode RISK d'avoir pratiquement un bassin caractérisé par une vulnérabilité forte (Cas 5, Annexe 2). L'identification du critère épikarst en tant que tel, a comme conséquence pour une pondération identique de refaire sortir l'influence des zones de dolines ; deux classes de vulnérabilité moyenne et forte caractérisent le bassin d'alimentation (Cas 3, Annexe 2)

5.3.6. Commentaires généraux

La carte de vulnérabilité globale de la méthode RISK semble être cohérente, distinguant plusieurs zones de vulnérabilité marquées soit par le critère infiltration, soit par la combinaison infiltration, roche et sol. Le marais de Saône ainsi que le bassin versant du ruisseau de Nancray ressortent comme zones les plus vulnérables. Au vu du rôle hydrogéologique du marais de Nancray, qui en périodes de hautes eaux est inondé et se vidangent en quelques heures, la vulnérabilité de cette zone est importante. Des périmètres de protection définis sur la base de cette carte de vulnérabilité se rapprocheraient des périmètres de la DUP de la source d'Arcier.

5.4. CAS D'ÉTUDE – SYSTÈME KARSTIQUE DE LA SOURCE D'UZELLE

5.4.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

La source Crêpot à Uzelle se situe dans le département du Doubs à 13 km au Nord de Baume-les-Dames. Elle émerge d'une petite structure géologique qui se rattache à la zone des plateaux de la Haute-Saône. Son bassin d'alimentation est peu étendu, environ 1 km², de même que son débit. Cette source est captée pour l'alimentation de la commune.

5.4.2. Structure géologique

Les formations concernées par le bassin d'alimentation de la source d'Uzelle sont, de bas en haut :

- les marnes du Toarcien ; la base de cette formation n'affleure pas dans les environs d'Uzelle,
- les calcaires sableux à oolithes ferrugineuses de l'Aalénien d'environ 20 m d'épaisseur,
- les calcaires du Bajocien inférieur et moyen, d'un épaisseur de 60 m ; ils se composent de différents faciès calcaires (calcaires massifs, calcaires oolithiques, calcaires à entroques).

La structure du bassin consiste en une colline qui culmine à 465 m d'altitude, la colline de Montécu et Travaret, et qui est occupée par une série monoclinale à pendage Sud à Sud-Est affectée par des failles Nord-Sud. Du Nord au Sud on rencontre ainsi à l'affleurement, les marnes du Toarcien, les calcaires de l'Aalénien puis les calcaires du Bajocien qui forme une surface sub-structurale en pente vers le Sud (depuis les points les plus hauts du bassin à 465 m d'altitude). Enfin affleure de nouveau le calcaire de l'Aalénien dans le bourg d'Uzelle où sort la source de Crêpot à 390 m d'altitude.

5.4.3. Hydrogéologie

Les marnes du Toarcien constituent le substratum de l'aquifère des calcaires de l'Aalénien-Bajocien qui a la source Crêpot comme exutoire. Le bassin est limité :

- vers le Nord par l'affleurement des marnes du Toarcien du versant Nord de la colline,
- vers l'Ouest par l'affleurement des marnes du Toarcien qui réapparaissent du fait d'une faille Nord-Sud qui remonte son compartiment Ouest.

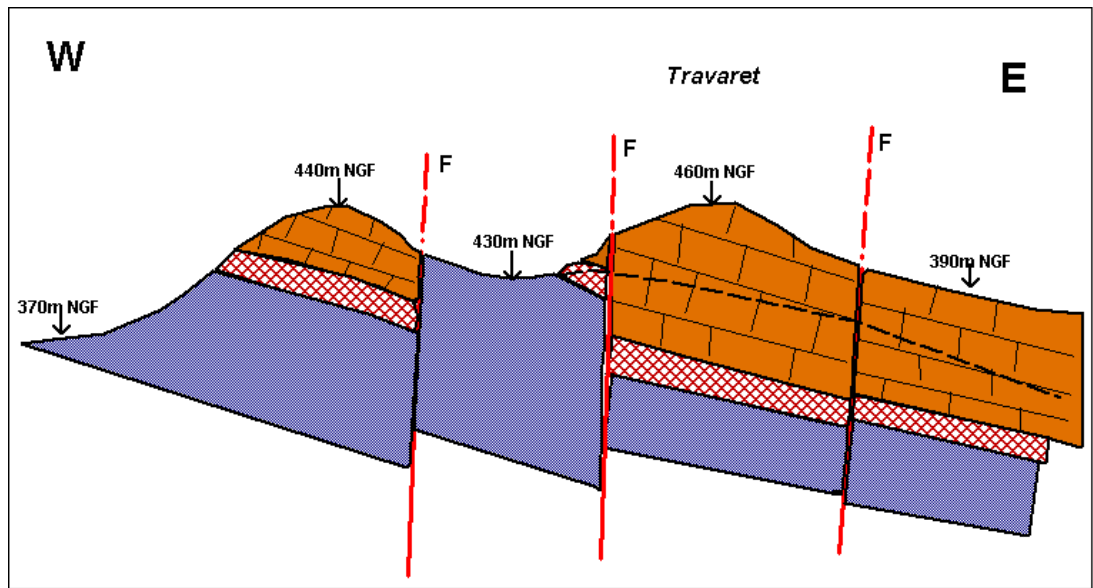


Illustration 37 - Schéma structural 1 : coupe W-E passant à quelques 800 m au N de la source Crépôt.

Légende : en bleu : Lias Marneux (I5) ; en rouge à croisillons : Aalénien (env. 20 m) (I6) et en brun faciès calcaire : Bajocien (env. 60 m, (I1a)).

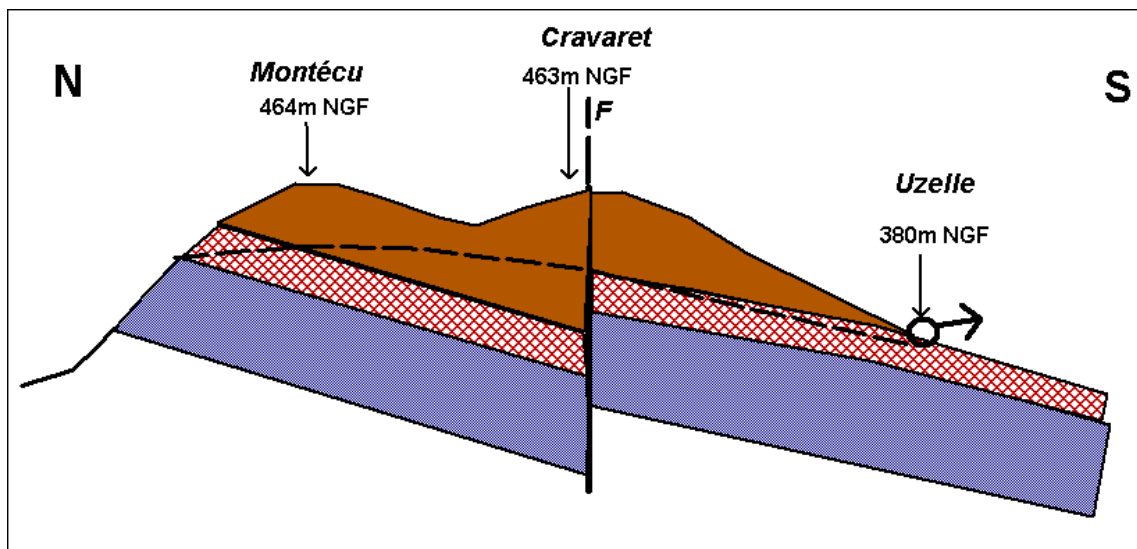


Illustration 38 - Schéma structural 2 : coupe NS passant par la source de Crépôt à Uzelle. Légende identique à l'illustration 4, position de la source et du niveau piézométrique approximative.

Vers l'Est, la limite du bassin d'alimentation est plus difficile à tracer. En effet, les niveaux des calcaires du Bajocien continuent d'affleurer dans cette direction. La limite Est du bassin est vraisemblablement constituée par une ligne de partage des eaux

souterraines entre la source Crêpot et la source du Moulin. Cette dernière source est une importante source karstique qui sort des calcaires du Bajocien au fond d'un vallon à 330 m d'altitude et à 1 300 m au Sud-Est de la source Crêpot. Compte tenu de l'altitude basse de la source du Moulin il est peut-être possible qu'en étiage sévère, la ligne de partage des eaux souterraines disparaisse et que la source Crêpot tarisse totalement au profit de cette source du Moulin (illustration 37).

Le bassin d'alimentation de la source Crêpot est alimenté par les précipitations sur les surfaces d'affleurement des formations aquifère constitutives, les calcaires de l'Aalénien et surtout du Bajocien qui constituent la colline de Montécu et Travaret et tout son versant Sud. Les écoulements dans l'aquifère se font vers le Sud en direction de la source, aidés par le pendage vers le Sud du substratum des marnes du Toarcien et par les grandes failles Nord-Sud.

5.4.4. Caractérisation des critères

a. Développement de la karstification

Le système aquifère de la source du Crêpôt d'Uzelle au vu des faibles données disponibles permettant de caractériser le type de fonctionnement de la source, a été classé comme un système de vulnérabilité moyenne vis-à-vis du développement de la karstification à l'échelle de l'ensemble du bassin d'alimentation (illustration 40).

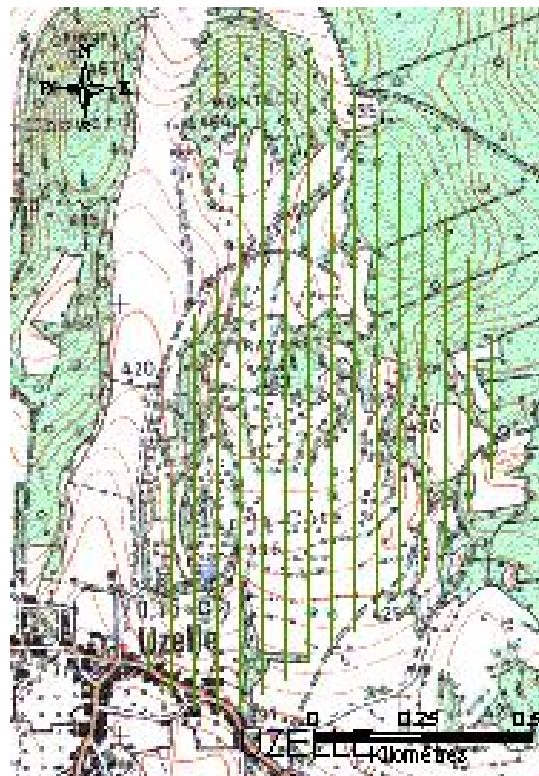


Illustration 39 - Carte du critère K à l'échelle du bassin d'alimentation de la source du Crêpôt d'Uzelle.

b. Nature de la roche aquifère

Au vu de la lithologie de la roche aquifère du système aquifère de la source du Crépôt à Uzelle, à savoir les calcaires sableux à oolithes ferrugineuses de l'Aalénien et des faciès calcaires (massifs, oolithiques et calcaires à entroques) du Bajocien inférieur et moyen, le critère R0 a été appliqué à l'ensemble du bassin d'alimentation (Illustration 40).

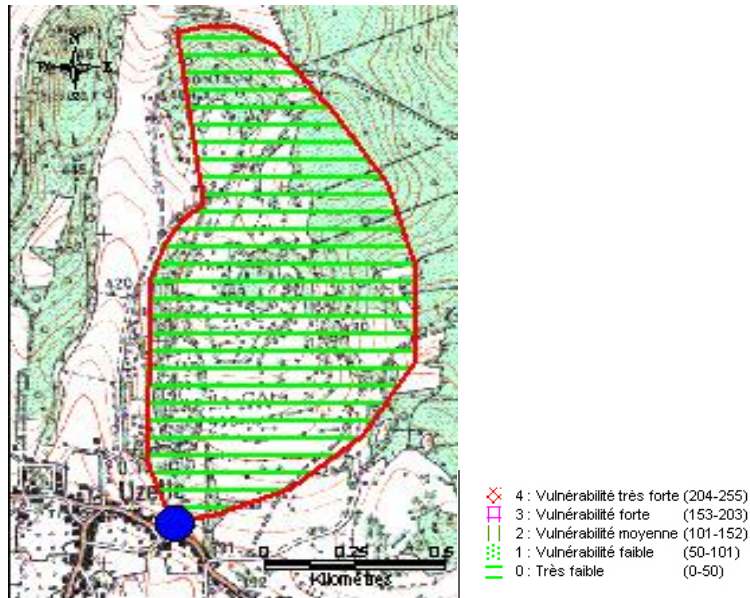


Illustration 40 - Carte du critère K pour le bassin d'alimentation de la source du Crépôt à Uzelle.

c. Conditions d'infiltration

Les classes pour le critère d'infiltration ont été déterminées selon la définition des différentes classes à l'aide du modèle numérique de terrain ainsi qu'à l'aide de la détermination des objets de morphologie karstique. Trois classes sont présentes pour le critère I : (i) la classe I₁ de vulnérabilité faible, liée aux pentes élevées du bassin où le ruissellement est dominant, (ii) la classe I₂ de vulnérabilité moyenne vis-à-vis de l'infiltration et (iii) la classe I₃ de vulnérabilité forte, correspondant à des replats, ou à une combinaison avec des dolines, une vallée sèche (Illustration 41).

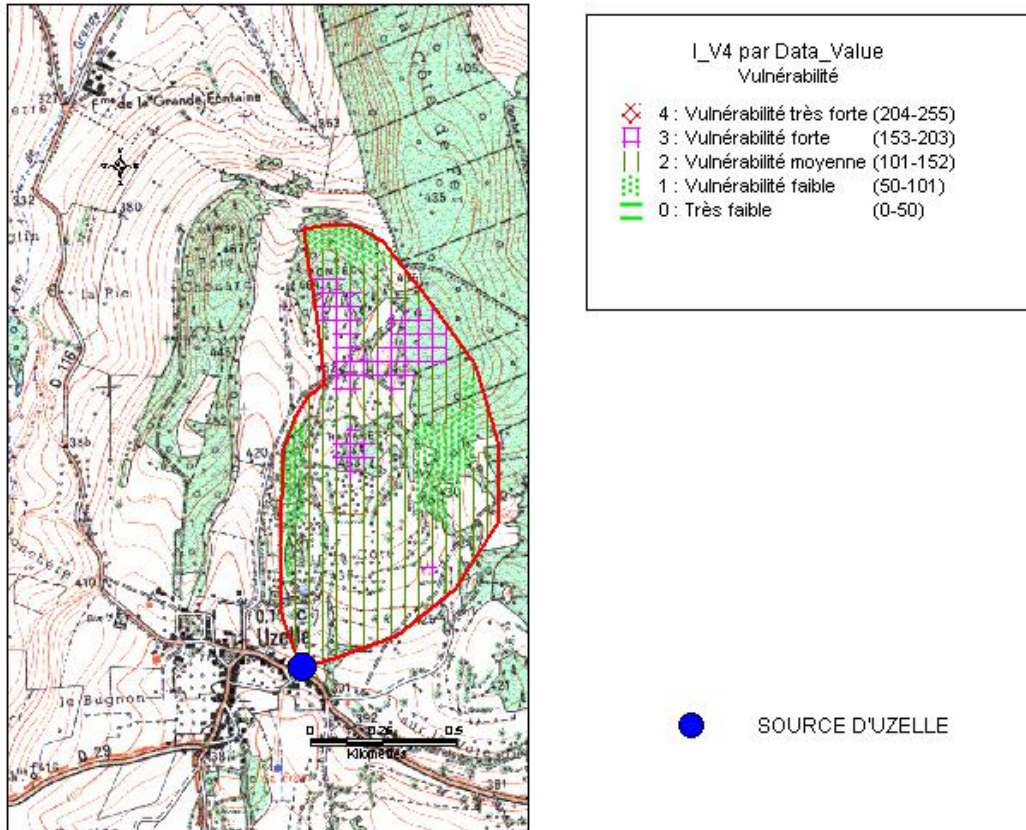


Illustration 41 - Carte du critère I du bassin d'alimentation de la source du Crépôt à Uzelle.

d. Sol – couverture protectrice

La cartographie du critère S a été déterminé à partir d'observations de terrains, de quelques 5 points de détermination de la profondeur du sol à l'aide d'une tarière manuelle et d'application d'une caractéristique de similitude morphologique (une profondeur de sol déterminée en un point est appliquée à une zone géographique de morphologie identique). Deux classes sont ainsi identifiées, une de classe 3 sur l'essentiel du bassin, correspondant à une profondeur de sol inférieur à 20 cm et une de classe 2, correspondant à une profondeur de sol entre 100 et 20 cm. Cette deuxième classe est située dans la partie nord du bassin, au niveau d'une zone la plus déprimée du bassin (Illustration 42). Une cartographie pédologique détaillée n'est pas nécessaire dans ce cas.

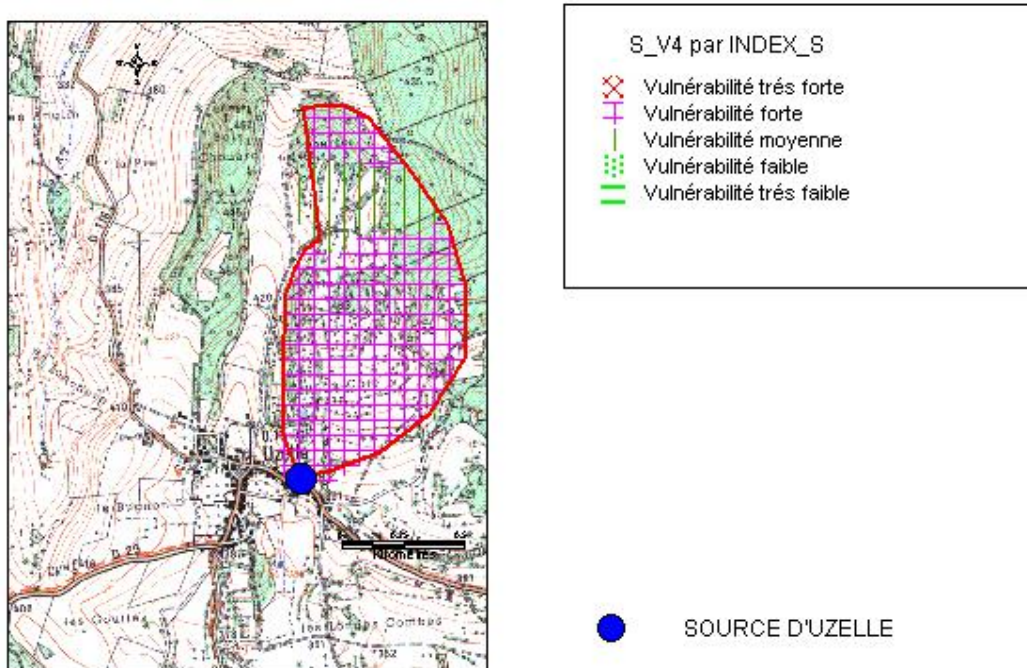


Illustration 42 - Carte du critère S pour le bassin d'alimentation de la source de Crépôt d'Uzelle.

5.4.5. Carte de vulnérabilité

Deux cartes de vulnérabilité ont été établies, une première selon la méthode RISK à l'aide de la pondération suivante : $0,1 R + 0,5 I + 0,1 S + 0,3 K$. La vulnérabilité du bassin d'alimentation de la source du Crépôt est caractérisée par deux classes de vulnérabilité : (i) la classe 2 de vulnérabilité moyenne sur l'essentiel du bassin, (ii) la classe 3 de vulnérabilité forte sur les zones de vulnérabilité forte vis-à-vis de l'infiltration (dolines, surface plane, vallons) (Illustration 43).

La carte de vulnérabilité établie à l'aide de la méthode RISKE, en considérant le critère épikarst en dehors du critère d'infiltration se distingue de la précédente par la présence de la classe de vulnérabilité faible dans le secteur septentrional, et par une zone de classe de vulnérabilité forte de plus faible superficie. La classe de vulnérabilité moyenne est de superficie plus importante, et majoritaire à l'échelle du bassin d'alimentation (Illustration 44).

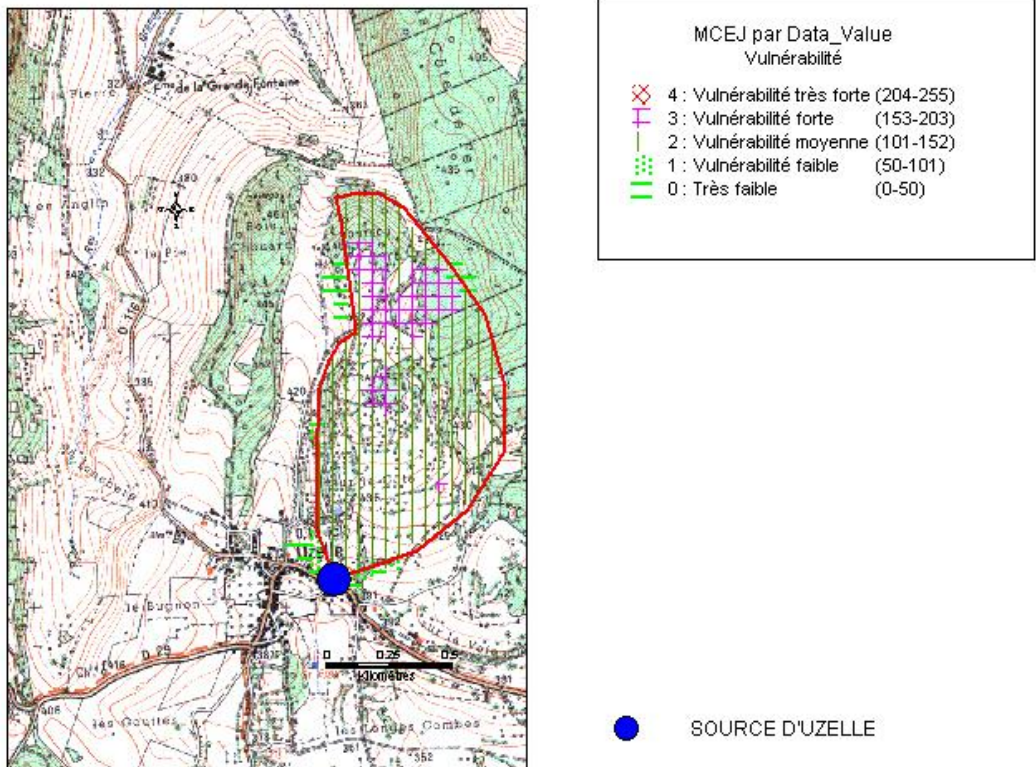


Illustration 43 - Carte de la vulnérabilité globale pour le bassin d'alimentation de la source du Crépôt d'Uzelle selon la méthode RISK.

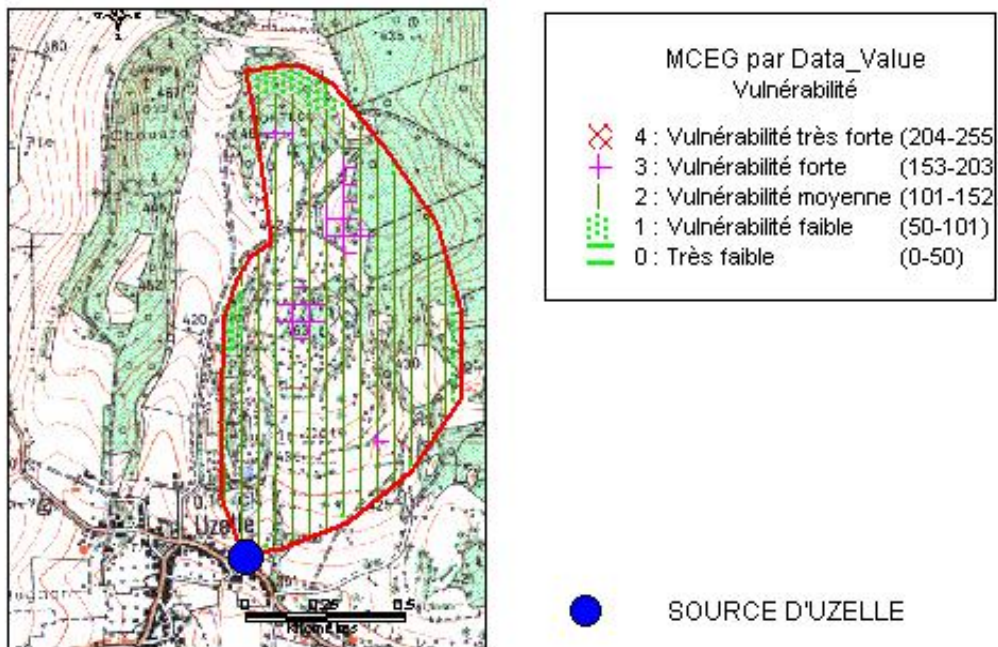


Illustration 44 - Carte de la vulnérabilité pour la méthode RISKE.

5.4.6. Commentaires généraux

La carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation de la source du Crépôt d'Uzelle permettrait de définir un périmètre de protection éloigné sur la quasi-totalité de la surface du bassin, un périmètre de protection rapproché ciblé sur trois secteurs. Le périmètre de protection immédiat correspondrait uniquement au périmètre direct du captage de la source.

6. Evaluation économique de la mise en œuvre du périmètre de protection de la source d'Arcier

6.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objectif de déterminer une méthodologie de calcul du coût de mise en œuvre d'un périmètre de protection de captage. La méthodologie développée est alors appliquée au périmètre de protection de la source d'Arcier, à partir d'une série non exhaustive d'informations collectées auprès de diverses institutions. La liste des personnes contactées au sein de ces institutions figure en annexe 3 de ce document.

La mise en œuvre de périmètres de protection ne donne que très rarement lieu à une évaluation de son coût. Le plus souvent, lorsque cela ne concerne pas un projet d'exploitation de ressource nouvelle, les périmètres de protection sont instaurés pour se conformer à la réglementation en vigueur. Dans ce cas, l'évaluation du coût de sa mise en œuvre n'est pas considérée comme un critère d'aide à la décision et l'évaluation n'est pas réalisée, ni même la simple sommation des dépenses occasionnées. Une telle analyse est alors perçue comme générant un coût supplémentaire. Pourtant, même dans une optique de régularisation (où différentes options techniques d'exploitation ne sont pas comparées), une évaluation économique peut s'avérer efficace pour comparer différentes options de délimitation de périmètres (option de précaution où le périmètre est volontairement large ou option minimaliste) ou d'opportunité d'instaurer certaines prescriptions au regard des coûts associés qu'elles génèreraient.

Si de telles évaluations ne sont que très rarement effectuées, c'est également à cause de la complexité apparente de la tâche. Or, la mise en œuvre d'outils d'analyse économique relativement simples et compréhensibles par des non-économistes permet assez aisément d'évaluer un coût de mise en œuvre dès lors que les données nécessaires sont disponibles.

6.2. ELÉMENTS DE DÉFINITION

Afin d'éviter certaines confusions, nous rappelons ici quelques définitions utiles de concepts de base en économie tels que le coût, le prix, la dépense, l'utilité, le surplus et la valeur, qui sont parfois utilisés à tort de manière interchangeable (Gleyses et Loubier 2000) avant de présenter plus en détail une typologie des coûts.

6.2.1. Rappel généraux

« Les coûts sont l'ensemble des dépenses monétaires et non monétaires nécessaires à la mise en œuvre des ressources diverses en vue de l'obtention d'un produit

spécifique. Parmi les éléments non monétaires, on compte le recours aux mesures non réglementaires, les inconvénients subits par autrui ou la dégradation du milieu environnant et les coûts d'opportunité qui indiquent les avantages qu'un autre usage des mêmes ressources aurait permis d'obtenir » (Benard 1985).

Le prix est l'expression monétaire de la valeur d'échange d'une marchandise. En régime de concurrence pure et parfaite, le prix est le résultat de la confrontation de l'offre et de la demande sur un marché. Mais lorsque les conditions de concurrence ne sont pas réunies, différentes modalités de formation des prix existent : prix administrés, prix de monopole, ou bien prix déterminés de façon à ce que l'entrepreneur couvre ses coûts de production auxquels on rajoute une marge commerciale.

Les dépenses correspondent au produit du prix par les quantités.

L'utilité désigne généralement la satisfaction, l'avantage retiré de la consommation d'un bien ou d'un service ou bien la disposition à payer pour en bénéficier. L'utilité est, par conséquent, subjective et différente du prix.

Pour un actif marchand, le surplus est la différence entre l'utilité et la dépense (le produit du prix par les quantités). Pour un actif non marchand, c'est-à-dire en l'absence de prix, le surplus est égal à l'utilité.

La valeur est un concept qui n'a cessé de s'enrichir. Le concept le plus avancé aujourd'hui selon (Garrabé 1994) est dérivé de la Valeur Economique Totale (V.E.T.) de (Pearce and Markandia 1989). Les composants de cette valeur sont multiples et peuvent s'identifier en croisant le type d'acteur et le type de valeur. Dans l'illustration 45 « Soi » est relatif aux valeurs qu'un individu attribue à un bien par rapport à lui-même ; « Autres » fait référence aux valeurs qu'il attribue à un bien du simple fait de savoir qu'il est disponible par d'autres.

| Acteur | Valeur présente | Valeur future |
|---------------|--|---|
| Soi | Valeur d'usage présent Valeur d'existence | Valeur d'option Valeur de quasi-option Valeur potentielle |
| Autres | Valeur par procuration | Valeur d'héritage Valeur potentielle |
| | Valeur écologique | |

Illustration 45 - Type d'acteur et type de valeur (source : (Garrabé 1994)).

6.2.2. Typologie des coûts

Dans le cadre de notre étude, la typologie des coûts directs ou indirects se fait par rapport à l'activité étudiée c'est-à-dire la mise en œuvre du périmètre de protection de la source d'Arcier. Les coûts directs sont par exemple l'achat des parcelles des périmètres de protection immédiate, leur aménagement ou l'ensemble des études préalables nécessaires.

Par opposition, les coûts non occasionnés par le projet lui-même mais par des activités qu'il induit du fait même de son existence sont qualifiés de coûts indirects. C'est le cas par exemple de la perte de recettes fiscales locales lorsque des prescriptions conduisent à réduire certaines activités (agricoles, industrielles, de service ou d'usage du sol).

Les coûts donnant lieu à contrepartie monétaire sont assez aisément évaluables par simple observation de documents comptables standards (prix, factures, comptes d'exploitation ou bilans), ou, si les coûts sont à venir, par des analyses de marché, des dires d'experts, sur devis ou par simple observation de cas similaires. Cependant, tout les coûts, qu'ils soient présents ou passés, ne donnent ou ne donneront pas nécessairement lieu à contrepartie monétaire pour deux raisons: soit il n'est simplement pas prévu d'indemniser un agent pour un préjudice qu'il subit, soit le préjudice n'a pas de contrepartie monétaire. Dans le premier cas, l'évaluation se fait comme pour les coûts marchands en faisant l'hypothèse de dédommagement alors que dans le second, il est nécessaire de recourir à des méthodes de valorisation spécifiques (Gleyses and Loubier 2000). C'est souvent le cas pour évaluer les coûts environnementaux ou des réductions d'aménités environnementales telles que des atteintes aux paysages ou à la libre circulation sur des sites tels que les périmètres de protection immédiate.

L'occurrence des coûts est un élément essentiel dans l'évaluation économique des périmètres de protection. Certains coûts peuvent être ponctuels, ce sont souvent des coûts d'investissement ou récurrents, c'est le cas des pertes annuelles de revenu pour certains agriculteurs, la réduction des recettes fiscales locales ou l'organisation régulière de réunions relatives au périmètre de protection. C'est essentiellement à cause de l'existence de ces deux types de coûts que les évaluations économiques ne sont rarement réalisées. En effet, il paraît a priori difficile de comparer ou de sommer un coût actuel d'investissement à un coût annuel (récurrent) de perte de revenu. Une vision comptable, mais fautive en économie, consisterait simplement à diviser le coût ponctuel par le nombre d'année d'occurrence du coût récurrent puis de les sommer, ou inversement, de multiplier le coût récurrent par son nombre d'années d'occurrence et de l'additionner au coût ponctuel. Or, ce raisonnement est faux car d'une part il est inapplicable lorsque le coût récurrent n'est pas borné dans le temps (on parle d'horizon infini), et d'autre part car il néglige la prise en compte de la préférence pour le présent.

En économie, c'est le principe de l'actualisation qui permet d'illustrer cette préférence pour le présent et qui se traduit concrètement par la préférence qu'ont les individus pour subir un même coût dans le futur plutôt qu'aujourd'hui.

Le principe de l'actualisation est l'inverse du principe de la capitalisation. Le choix du taux d'actualisation à retenir pour l'analyse est primordial. Généralement, lorsque le projet étudié est de nature environnemental, on retient un taux relativement faible, de l'ordre de 3 %.

Prenons les exemples suivants :

1. Le coût actuel (VA) d'un coût ponctuel (cp) futur (en année t) est égal à :

$$CA_{cp} = \frac{CP}{(1+a)^t} \quad \text{où "a" est le taux d'actualisation et « t » la date de son occurrence.}$$

Notons que

si $t = 10$, $a = 3\%$ et $CP = 100$, alors $CA_{cp} = 74.4$

et si $t = 0$, alors $CA_{cp} = CP = 100$

2. Le coût actuel d'une même somme de coûts récurrents (CR) de l'année 1 à l'année 10 est égal à :

$$CA_{cr} = \frac{CR}{(1+a)^1} + \dots + \frac{CR}{(1+a)^{10}} = \frac{CR \left[(1+a)^{10} - 1 \right]}{a(1+a)^{10}}$$

si $CR = 5$, $a = 3\%$ et $t = 20$ ans, alors $CA_{cr} = 74.4$.

L'exemple numérique choisi permet non seulement de montrer que les coûts ponctuels et récurrents sont sommables mais également qu'un coût de 100 dans 10 ans équivaut à un coût annuel de 5 par an pendant 20 ans.

Le coût actuel total (CTA) est égal à $CA_{cp} + CA_{cr} = 149$.

A partir de ce coût actuel total, nous pouvons calculer le coût annuel moyen (CMA) (sur un horizon infini) simplement en multipliant le premier par la valeur du taux d'actualisation.

$CMA = a \cdot CTA = 4.46$ (pour plus d'information sur la méthode, les lecteurs pourront se reporter à (Loubier 2003) chapitre 2.2 et annexe 6).

Qu'ils soient ponctuels ou récurrents, l'évaluation des coûts est différente selon qu'ils se sont réalisés dans le passé, le présent ou qu'ils se réaliseront dans le futur. Dans toute évaluation économique, il est nécessaire de définir l'année de référence afin d'exprimer l'ensemble des coûts dans la valeur de cette année là. Cette année de référence, peut être l'année courante, l'année de début de l'étude ou bien une année passée donnée lorsque l'on réalise une évaluation a posteriori.

Ainsi, l'année de référence correspond à $t = 0$. Alors, tous les coûts postérieurs devront être évalués comme précédemment en recourant à la technique de l'actualisation et tous les coûts antérieurs seront exprimés en valeur de l'année de référence en utilisant des indices de variation des prix spécifiques ou généraux.

Prenons l'exemple d'une amélioration d'une station de traitement des eaux usées, réalisée en 1995, pour une valeur (V) de 100 avec une année de référence égale à 2004. En utilisant l'indice TP01 (Bâtiment et Travaux Publics - Index général, tous travaux), on obtient le coût actuel (CA) de la manière suivante.

$$CA_v = V \frac{TP01_{2004}}{TP01_{1995}} = 100 \times \frac{511}{391} = 130$$

De nombreux indices statistiques sont disponibles sur le site de l'INSEE à l'adresse suivante: http://www.indices.insee.fr/bsweb/servlet/bsweb?action=BS_RECHGUIDEE&BS_IDARBO=18000000000000.

6.3. APPLICATION

La méthodologie présentée ici s'articule autour de quatre phases. Sa mise en œuvre ne peut bien évidemment commencer qu'après le rapport de l'hydrogéologue agréé ou après que celui-ci ait défini différentes options de périmètres dont le choix définitif pourrait se faire au regard d'une analyse économique. Dans le cas présent, nous nous basons sur l'arrêté préfectoral n° 3316 du 8 juin 2004.

C'est en effet à partir des prescriptions formulées dans cet arrêté que nous construisons une matrice des contraintes associées aux prescriptions, que nous identifions les coûts associés avant de les évaluer et de les agréger.

Compte tenu du peu d'information disponible pour réaliser cette évaluation, nous réalisons également une analyse de sensibilité en se basant sur des hypothèses hautes et basses d'évaluation des coûts précédents.

6.3.1. Phase 1 : Construction de la matrice des prescriptions

La première phase consiste, à partir de l'arrêté préfectoral n° 3316, à construire une matrice croisant les prescriptions et les types de périmètres de protection (immédiate, reprochée et éloignée).

Le principe de construction de la matrice (illustration 46) est d'établir une liste exhaustive de prescriptions puis de mentionner les périmètres de protection (immédiate, rapprochée A B C & D, éloignée) auxquels elles se rattachent afin de préparer la phase suivante d'identification des coûts associés.

Lors de cette première phase, il est capital d'identifier, les prescriptions qui sont réellement attribuables à la mise en œuvre du périmètre de protection et celles qui découlent du respect d'autres législations en vigueur. C'est notamment le cas de toutes les activités agricoles qui sont soumises (indépendamment des prescriptions de l'arrêté) au respect du code des bonnes pratiques agricoles défini dans l'arrêté du 22 novembre 1993 ainsi que l'activité de stockage d'hydrocarbure de l'aérodrome de la commune de La Vèze (réglementée par la législation en vigueur sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) et d'un ensemble de prescriptions (non mentionnées dans l'illustration 47) relatives à la qualité de l'eau (Règlement Sanitaire Départemental).

Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques

| | PPI | PPRA | PPRB | PPRC | PPRD | PPE |
|---|---|---|------|--|------|--|
| Propriété des parcelles | Maître d'ouvrage | | | | | |
| Activités interdites | Toutes sauf désherbage mécanique et exploitation de la source | Voir les contraintes ci-dessous pour les activités présentes. Sont également interdites, toutes les activités futures de nature à porter atteinte à la productivité et à la qualité de la source d'Arcier | | | | |
| Clôtures | Oeil de Bœuf et Fontaine du Grand Saone | | | | | |
| Déversoirs d'orages de Saône | Munir d'un bassin de dépollution | | | | | |
| Utilisation de produits phytosanitaires | | Interdits sauf pour traitement localisé des prairies | | | | |
| Stockage d'hydrocarbures Aéroport de La Vèze | | Devra respecter la législation sur les ICPE | | | | |
| Eaux Usées et pluviales de l'aéroport de La Vèze | | Obligation de traitement avant rejet | | | | |
| Eaux Usées et pluviales de l'aire de repos de la RN57 | | Obligation de traitement avant rejet | | | | |
| Zones boisées | | Conservation de la vocation forestière | | | | |
| Prairies permanentes | | Maintenues en l'état et exploitées uniquement pour le fourrage et le pacage extensif | | | | |
| Zones de friches | | Reconverties en bois ou prairies permanentes | | | | |
| Epanchages d'effluents organiques liquides | | Interdits | | | | |
| Epanchages de fumiers et engrais minéraux | | Doit respecter le Code des Bonnes Pratiques Agricoles et limité à l'entretien des prairies sur le PPRA | | | | |
| Rejets d'effluents agricoles et domestiques | | Interdits | | | | |
| Extraction de matériaux | | Interdits | | | | |
| Exploitation de la forêt | | Sans travail du sol et sans création | | | | |
| Stockage des hydrocarbures | | Interdit sauf pour habitations dont c'est le moyen de chauffage | | | | |
| Assainissement des habitations existantes | | Conforme à la réglementation en vigueur ou raccordement au réseau collectif | | Obligation de se raccorder au réseau collectif | | |
| Extension et modification des constructions existantes | | Autorisé si n'induit aucun risque supplémentaire de pollution | | Idem PPR A&B | | |
| Nouvelles constructions | | Interdites | | | | |
| Travaux de terrassement, drainage, remblaiement et tranchées (PPRC) | | Interdits | | | | |
| Stockage et dépôts temporaires ou permanents de matières | | Interdits | | | | |
| Servitude de passage | | Sur tous les terrains | | | | |
| Mise en place d'une commission de suivi | | | | | | |
| Cartographie d'aptitude à l'épandage | | | | | | Réalisée sur tout le PPE |
| Etudes diagnostiques des systèmes d'assainissement des communes | | | | | | Programme d'amélioration des infrastructures |

Illustration 46 - Matrice des prescriptions.

6.3.2. Phase 2 : Identification et évaluation des coûts associés à la matrice des prescriptions

La seconde phase consiste à construire, sur la base de la matrice des prescriptions précédente, une matrice des coûts associés (illustration 47) imputables à la mise en œuvre du périmètre de protection. Ces coûts peuvent être directs, indirects, marchands, non marchands, ponctuels ou récurrents.

| | PPI | PPRA | PPRB | PPRC | PPRD | PPE |
|---|-----|------|------|------|------|-----|
| Propriété des parcelles | 1 | | | | | |
| Activités interdites | 2 | | | 3 | | |
| Clôtures | 4 | | | | | |
| Déversoirs d'orages de Saône | 5 | | | | | |
| Utilisation de produits phytosanitaires | | 6 | | | | |
| Stockage d'hydrocarbures Aéroport de La Vèze | | 7 | | | | |
| Eaux Usées et pluviales de l'aéroport de La Vèze | | 8 | | | | |
| Eaux Usées et pluviales de l'aire de repos de la RN57 | | 9 | | | | |
| Zones boisées | | 10 | | | | |
| Prairies permanentes | | 11 | | | | |
| Zones de friches | | 12 | | | | |
| Épandages d'effluents organiques liquides | | 13 | | | | |
| Épandages de fumiers et engrais minéraux | | 14 | | | | |
| Rejets d'effluents agricoles et domestiques | | 15 | | | | |
| Extraction de matériaux | | 16 | | | | |
| Exploitation de la forêt | | 17 | | | | |
| Stockage des hydrocarbures | | 18 | | | | |
| Assainissement des habitations existantes | | 19 | | | 20 | |
| Extension et modification des constructions existantes | | 21 | | | 21 | |
| Nouvelles constructions | | 22 | | | | |
| Travaux de terrassement, drainage, remblaiement et tranchées (PPRC) | | 23 | | | | |
| Stockage et dépôts temporaires ou permanents de matières | | 24 | | | | |
| Servitude de passage | | | | 25 | | |
| Mise en place d'une commission de suivi | | 26 | | | | |
| Cartographie d'aptitude à l'épandage | | | | | | 27 |
| Études diagnostiques des systèmes d'assainissement des communes | | | | | | 28 |

Illustration 47 - Matrice des coûts associés aux prescriptions.

Les coûts de cette matrice (illustration 47), numérotés 1 à 28, sont détaillés et évalués ci-dessous.

1. Le coût d'achat, par la ville de Besançon, des parcelles inscrites dans les périmètres de protection immédiate sont des coûts marchands ponctuels. Ces coûts, évalués par les Domaines, correspondent aux indemnités versées aux anciens propriétaires. Ces indemnités correspondaient à 13 796 € en avril 2002 soit l'équivalent de 14 522 € en octobre 2004 (valeur 2004 estimée à partir de l'indice des prix à la consommation harmonisés).

$$CA_1 = 13796 \times \frac{114}{108.3} = 14522$$

2. La ville de Besançon étant propriétaire des parcelles inscrites dans le PPI, elle ne subit pas de préjudice lié aux prescriptions sur les activités, à l'exception de la contrainte de désherbage mécanique qui peut occasionner un surcoût ponctuel en matériel et récurrent en main-d'œuvre. Considérant que le surcoût en matériel est négligeable compte tenu de l'effet de taille des services techniques de la ville de Besançon, nous ne tenons compte que du surcoût en main-d'œuvre soit 600€/an (8h par jour de travail, 5 jours par an à un coût horaire de 15 €) ce qui correspond à un coût total de 20 000€ (coût de l'année 2004 à l'infini en utilisant un taux d'actualisation de 3 %).

$$CA_2 = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{600}{(1.03)^t} = \frac{600}{0.03} = 20\ 000$$

3. Les coûts liés à la limitation des activités sur les PPR et PPE sont pour partie évalués ci-dessous.
4. La mise en place de clôture autour des PPI et non inondables occasionne un coût ponctuel d'investissement évaluables à partir de factures ou devis. En avril 2002, la dépense était de 30 600€ pour réaliser barrières et murets autour de la Fontaine du Grand Saône et de l'œil de Bœuf, soit 32 773€ en valeur Octobre 2004 (utilisation de l'indice des prix à la construction).

$$CA_4 = 30600 \times \frac{1267}{1183} = 32773$$

5. La création des déversoirs d'orages et de station de pré traitement des eaux pluviales de commune de Saône génère d'importants coûts ponctuels d'investissement, évaluables sur facture ou devis. Même si les travaux en cours de réalisation vont au-delà des prescriptions, on peut considérer qu'ils sont intégralement imputables au PP car ils n'auraient pas été initiés sans la mise en œuvre de ce dernier. Ces travaux s'articulent en deux phases. La première, déjà réalisée a un coût de 1 670 000 € (870 000 tranche 1 et 800 000 tranche 2). Le coût de la seconde tranche est estimé entre 800 000 et 1M€. Nous retenons ici la borne haute. Au total, et en supposant que les travaux de la tranche 2 soient réalisés en 2005, cela représente un coût total de 2 640 674 €.

$$CA_5 = 1670000 + \frac{1000000}{1,03} = 2640674$$

6. La zone PPRA est essentiellement une zone de marais. Les quelques parcelles agricoles sont, à l'exception d'une, des prairies permanentes pour lesquelles la contrainte de traitement localisé n'a qu'un préjudice marginal. Pour cette raison et car nous ne disposons pas des informations relatives à la superficie de ces parcelles, nous choisissons de négliger le coût associé à cette prescription. Théoriquement, ce coût devrait correspondre à la somme actualisée des différentiels de marge brute avant et après prescription.
7. Les contraintes de stockage d'hydrocarbures de l'aérodrome de La Vèze sont relatives à la législation sur les ICPE. Les coûts associés ne sont donc pas évalués ici.
8. L'obligation de traitement avant rejet des eaux usées et pluviales de l'aérodrome de La Vèze occasionne des coûts ponctuels marchands d'investissement.
 - Si l'on considère que le coût de raccordement au réseau collectif d'assainissement est prohibitif compte tenu des distances qui séparent l'aérodrome des zones équipées, il faut envisager d'investir environ 15 000 € pour bénéficier d'un assainissement autonome réalisé conformément aux dispositions de l'arrêté du 6 mai 1996 fixant les prescriptions techniques applicables aux systèmes d'assainissement non-collectif.
 - En supposant que cette prescription se traduise par l'obligation de mettre en place des fossés de récupération des eaux de ruissellement de la piste et d'un bassin de récupération, cela induirait un coût de l'ordre de 20 000 € pour les fossés (1 km de longueur à 20 € le mètre linéaire) et 100 000 € de bassin de récupération (coûts applicables aux infrastructures routières).

Nous retenons donc ici deux hypothèses :

- L'hypothèse basse consiste à ne prendre en compte que la contrainte d'assainissement, soit 15 000 €;
- L'hypothèse haute intégrant le coût relatif à la gestion des eaux pluviales, soit 135 000 €

Au total, $15000 < CA_g < 135000$

9. Les coûts de la prescription relative aux eaux usées et pluviales de l'aire de repos de la RN57, sont des coûts directs marchands évaluables sur devis. Comme dans le cas précédent, nous faisons deux hypothèses : un respect simple des prescriptions (H1) et une alternative dite de précaution consistant à mettre en place le long de la RN57 des fossés de récupération des eaux de ruissellement et de bassins de rétention (H2). Cette dernière hypothèse, même si elle n'est pas retenue dans l'arrêté préfectoral, a été évoquée par plusieurs personnes lors de la phase de collecte d'information.
 - Pour l'hypothèse H1, le coût correspond à la mise en place d'un assainissement autonome de l'aire de repos, comparable à celui de l'aérodrome, pour un coût de 15 000 €, à 200 mètres de fossés de récupération des eaux pluviales pour un coût de 5 000 € et à un bassin de rétention pour un coût de 20 000 € compte tenu de sa

modeste capacité. Au total, le coût relatif à l'hypothèse basse (H1) est évalué à 40 000 €.

- Pour l'hypothèse haute H2, le coût correspond au coût précédent auquel nous ajoutons le coût des 3 km de fossés de récupération des eaux de ruissellement le long de la RN57 (pour un coût de 75 000 €), le coût de deux grands bassins de récupération dépollution des eaux (300 000 €) et retranchons le coût du petit bassin de l'aire de repos (20 000 €). Le coût total relatif à l'hypothèse H2 est donc de l'ordre de 395 000 €.

Au total, $40000 < CA_y < 395000$

10. Nous n'identifions aucun coût associé à la contrainte de conservation de la vocation forestière des parcelles inscrites dans les PPR A&B.
11. Sur les PPR A&B, le coût de maintien en l'état des prairies permanentes et de leur exploitation uniquement pour le fourrage et le pacage extensif est négligeable car dans les 8 exploitations agricoles concernées, une seule parcelle n'était pas en prairie permanente avant la mise en œuvre du PP. Il est estimé, qu'en 2005, toutes les exploitations des PPR A&B auront souscrit un Contrat Territorial d'Exploitation « mise en herbe ».
12. Nous n'identifions aucun coût associé à la contrainte de conversion des zones de friches en prairies permanentes ou bois car aucun cas de parcelles concernées par cette prescription ne nous a été communiqué.
13. La contrainte d'épandage d'effluents organiques liquides sur les parcelles agricoles des PPR A&B n'occasionne pas de surcoût car la quasi-totalité des parcelles sont déjà converties en herbe. Si cela n'était pas le cas, le coût occasionné serait un coût non marchand récurrent évaluables à partir de la somme actualisée des différentiels de marge brute (avant et après prescription) ; ce différentiel intégrant une perte de revenu issu de la moindre valeur nutritive des parcelles pour l'alimentation du bétail (en pacage extensif) et un surcoût de transport des effluents à l'extérieur des parcelles. Dans la pratique, le « Protocole d'accord spécifique relatif à la protection des points de captage d'alimentation en eau potable et à l'indemnisation des servitudes consécutives à la mise en place des périmètres de protection », prévoit d'indemniser les propriétaire ou exploitants de la manière suivante.

$$I = \frac{E \times N \times C}{100}$$

- où
- I est l'indemnité parcellaire de l'individu (pour 1 hectare)
 - E est l'indemnité de perte de revenu (égale à 3,5 marges brutes soit au maximum 4000€/ha en 2002 selon « l'arrêté du 29 septembre 2003 portant fixation du barème indicatif de la valeur vénale moyenne des terres agricoles en 2002 »).
 - N est le nombre de points figurant en annexe II du protocole et prenant la valeur 10 pour une contrainte d'interdiction d'effluents organiques liquides.

C est le coefficient d'emprise variable selon le pourcentage de la surface comprise dans le périmètre de protection rapproché par rapport à la S.A.U de l'exploitation (C = 0,9 si l'emprise est comprise entre 0 et %, C = 1 si emprise comprise entre 5 et 10 % et C = 1,1 si emprise comprise entre 10 et 1 %, pour des emprises supérieures les indemnités sont évaluées spécifiquement).

Ces éléments nous conduisent à formuler une hypothèse haute de coûts associés à cette contrainte, correspondant à une situation où aucune parcelle n'aurait souscrit de CTE avant la mise en œuvre du PP. Dans ce cas, le coût serait de :

$$CA_{13} = S \times \frac{E \times N \times C}{100} = 400 \times \frac{(3,5 \times 4000) \times 10 \times 1}{100} = 560\,000 \text{ €}$$

S = superficie agricole de 400 hectares (intégralité du PPR B)

14. Le coût associé à la contrainte d'interdiction d'épandages de fumiers et engrais minéraux est nul pour les mêmes raisons que précédemment. Si nous faisons la même hypothèse (pas de CTE antérieurement aux PP), nous pouvons évaluer le surcoût en utilisant la même méthode mais avec une valeur de points égale à 40. Ceci conduit logiquement à un coût deux fois supérieur.

$$CA_{14} = 1\,120\,000 \text{ €}$$

15. Les contraintes de rejet d'effluents agricoles et domestiques sur les PPR A&B sont déjà réglementées par ailleurs (prescriptions 13, 14 et 19). Aucun coût n'y est donc associé ici.
16. Aucun coût d'extraction de matériaux n'est identifié bien qu'il ait existé par le passé quelques tourbières dans le PPR A.
17. Les superficies concernées par l'exploitation de la forêt sont faibles. Nous négligeons donc l'évaluation du surcoût potentiel lié à son exploitation sans travail du sol et sans création de piste.
18. Nous n'identifions aucun coût lié à l'interdiction de stockage d'hydrocarbures (autre que pour le chauffage des habitations) sur les PPR A&B. Le cas de l'aérodrome de La Vèze étant traité par ailleurs.
19. Les surcoût liés à la mise en conformité des système d'assainissement autonome des habitations existantes ou leur raccordement au réseau collectif sur les PPR A&B, sont des coûts ponctuels marchands. En supposant que les 18 habitations concernées peuvent techniquement se raccorder au réseau collectif, cette solution sera toujours préférée à l'assainissement autonome. La première coûtant en moyenne 4 000 € par branchement et la seconde 15 000 €. Le coût total est donc évalué à :

$$CA_{19} = 72\,000 \text{ €}$$

20. Les surcoût liés à l'obligation, pour les 23 habitations du PPR D, de se raccorder au réseau collectif d'assainissement sont évalués à :

$$CA_{20} = 92\,000 \text{ €}$$

21. Les coûts liés à l'interdiction d'extension et de modification des habitations existantes sur les PPR A, B et D est, à dire d'experts, relativement faible compte tenu de la dynamique démographique dans les villages considérés. Pour cette raison, et car l'évaluation est particulièrement incertaine, nous choisissons de négliger ce type de coût.
22. Les coûts liés à l'interdiction de toutes nouvelles constructions sur les PPR A, B et C, n'ont pas été réalisés faute de disponibilité d'informations centralisées sur les PLU ou POS des communes concernées. Toutefois, nous pouvons mentionner deux moyens d'évaluation utilisables. Une simple indemnité de perte de valeur vénale des parcelles dès lors que celles-ci étaient constructibles avant l'instauration du PP (méthode des Domaines) et l'évaluation d'une indemnité reposant sur une analyse probabiliste pour les parcelles non constructibles avant la mise en place du PP. Le principe est le suivant. On recherche (compte tenu de la dynamique démographique de la zone concernée) la date « T » à laquelle une parcelle est susceptible de devenir constructible ainsi que le différentiel de valeur vénale des parcelles à cette date « DVV ». Le montant du préjudice « P » est alors égal à :

$$P = \frac{DVV}{(1+a)^T}$$

23. Compte tenu de la faible valeur anticipée des coûts liés aux contraintes d'interdiction de travaux de terrassement, drainage, remblaiement et tranchée (PPRC), ceux-ci n'ont pas été évalués.
24. A l'exception d'une déchetterie qui semble se situer dans le PPR A mais pour laquelle nous ne disposons pas d'informations, l'aérodrome et les exploitations agricoles qui sont réglementées par la législation sur les ICPE, nous n'avons identifié aucun surcoût lié à l'interdiction de stockage et dépôt temporaire ou permanent de matières sur les PPR A, B et C.
25. Nous n'avons pas évalué le coût relatif aux servitudes de passage sur les PPR C&D qui, à la différence des servitudes d'utilité publique sont inscrites sur le livre d'urbanisme et non aux hypothèques.
26. L'arrêté préfectoral prévoit la mise en place d'une commission de suivi dont le coût sera à la charge de la ville de Besançon. Ce coût récurrent marchand est évalué à 15 000 € par an (un mi-temps de secrétaire), soit un coût actuel total de :

$$CA_{26} = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{15000}{(1+a)^t} = 500000 \text{ €}$$

27. La réalisation de la cartographie d'aptitude à l'épandage a coûté 15 245 € en 2002 soit l'équivalent de 16 047 € (valeur 2004 estimée à partir de l'indice des prix à la consommation harmonisés).
28. Nous ne disposons d'aucune information chiffrée sur le coût des études prescrites pour réaliser le diagnostic des systèmes d'assainissement des communes du PP, ni sur les éventuels coûts d'investissement qui en découleraient.

6.3.3. Phase 3 : Identification et évaluation de coûts non directement liés aux prescriptions

D'autres coûts, non attribuables directement aux prescriptions du PP sont identifiés.

1. Les coûts d'études préalables à la mise en œuvre du périmètre, sont évalués à 150 000 € depuis 5 ans pour la partie études et à 10 000 € d'honoraires pour les commissaires enquêteurs. Soit un coût total de :

$$CA_{29} = 160\,000 \text{ €}$$

2. Les coûts notariés et d'inscription aux hypothèques. Sur la base de la mise en œuvre d'un précédent périmètre de protection par la ville de Besançon, nous évaluons le coût d'inscription aux hypothèques ainsi que les coûts notariés associés à 80 € par parcelle. Si les quelques 1 200 parcelles des PPR font l'objet d'une telle procédure, cela représente un coût total actuel de :

$$CA_{30} = 96\,000 \text{ €}$$

3. Le coût de la mise en œuvre d'un programme d'action phytosanitaire sur le PPE est une action indépendante de la mise en œuvre du périmètre de protection mais dont les coûts peuvent y être attribués. Ce coût est évalué à partir de taux de fréquentation des agriculteurs a des réunions et comité de pilotage, du nombre moyen de réunions annuelles depuis 2002, de la durée moyenne de ces réunions et d'un coût horaire forfaitaire de 15 €/h. Ceci représente en 2003 un coût annuel moyen de 24 000 €. Toutefois, ce programme de « sensibilisation » ne s'inscrit pas dans la même durée que le PP. Il peut être stoppé dès que l'évolution de la réglementation (normes plus strictes) le rendra obsolète. Nous considérons que son espérance de durée de vie est de 10 ans. Ceci représente alors un coût total de :

$$CA_{31} = \sum_{t=1}^{t=10} \frac{24000}{(1+a)^t} = 204322 \text{ €}$$

4. Le coût de mise en place d'un système de détection globale de pollution de type truitomètre était évalué en 2002 à 13 720 € soit l'équivalent de :

$$CA_{32} = 13720 \times \frac{1267}{1183} = 14694 \text{ €}$$

6.3.4. Phase 4 : Agrégation des coûts

Au total, le coût de la mise en œuvre du périmètre de protection de la source d'Acier est donc estimé à :

- **3,9 M€ dans l'hypothèse basse**
- **6,1 M€ dans l'hypothèse haute**

6.4. CONCLUSION

Faute de disponibilité de données, tous les coûts imputables au périmètre de protection n'ont pas été évalués. Toutefois les fourchettes de coûts totaux indiquent que le coût de mise en œuvre du périmètre sont relativement faibles au regard du coût total de distribution de la ressource ; et que certaines alternatives ou options dites de précaution peuvent être économiquement justifiées compte tenu de la vulnérabilité de la ressource. En effet, si l'on considère que le volume moyen prélevé à la source d'Arcier est de 12 000 m³/jour, le coût total de mise en œuvre du périmètre est compris entre 0,89 et 1,41 €/m³ ou encore le coût moyen de longue période est compris entre 2,7 et 4,2 centimes d'Euros par mètre cube d'eau prélevé.

Ces faibles coûts relatifs justifient les stratégies de rachat systématique des parcelles des PPR.

7. Guide méthodologique

A l'issue de cette étude concernant le développement d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques comme outil objectif de détermination des périmètres de protection des captages d'eau souterraine, un guide méthodologique est proposé. Ce guide s'adresse aux administrations, aux collectivités propriétaires de captage d'eau pour l'AEP en milieu karstique, ainsi qu'aux hydrogéologues des bureaux d'étude et aux hydrogéologues agréés. La structure retenue pour ce guide méthodologique est présentée ci-après. Le guide méthodologique au format pdf sur CD Rom est joint à l'annexe 4.

Structure du guide méthodologique

Préface

Introduction : ce chapitre comprend des informations sur les aquifères karstiques, leur sensibilité aux contaminations, le cadre législatif concernant l'eau au niveau européen et au niveau national, la définition des périmètres de protection et les objectifs de nouvelles approches en lien avec les résultats de l'action européenne COST 620.

Vulnérabilité et environnement karstique : ce chapitre décrit les caractéristiques des systèmes karstiques, donne la définition de la vulnérabilité intrinsèque et/ou spécifique, les conséquences des caractéristiques karstiques en terme de vulnérabilité, le rôle de différents paramètres tels que la couverture protectrice, les conditions d'infiltration, l'épikarst, le degré de développement de la karstification.

Approche méthodologique : De la cartographie de la vulnérabilité, du risque, à la préconisation des périmètres de protection et à la méthodologie d'évaluation économique des coûts des périmètres de protection. Les principes de la méthode sont présentés ainsi que la définition des différents critères à cartographier, le système de pondération des différents critères et l'établissement de la carte de vulnérabilité globale. Quelques indications succinctes concernant la cartographie du risque sont évoquées.

Exemples d'application : l'application sur deux cas d'étude est présentée ; ces deux cas concernent deux bassins d'alimentation de sources karstiques de dimension contrastée (100 km² respectivement < 5 km²) pour Arcier et Crépôt à Uzelle. Les contextes géographiques, géologiques et hydrogéologiques sont présentés. Les cartes des différents critères ainsi que la carte de vulnérabilité sont commentées.

Conclusions et perspectives : conseils et limites de l'usage des cartes de vulnérabilités pour la détermination des périmètres de protection, ordre de grandeur de temps nécessaire pour la conception de cartes de vulnérabilité.

8. Perspectives et conclusion

A la lumière de l'analyse d'une dizaine de dossiers de périmètres de protection de captages en milieu karstique en Franche-Comté, il apparaît qu'il y ait une absence de méthodologie propre au milieu karstique utilisée pour la délimitation des périmètres de protection. La détermination des périmètres de protection n'est pas toujours fondée sur l'ensemble des résultats des études préalables. De manière pragmatique et en fonction de la taille du bassin d'alimentation concernée, le périmètre de protection éloignée est utilisé et appliqué au bassin d'alimentation dans son ensemble lorsque celui-ci est de grande taille ; le bassin d'alimentation peut être couvert par ailleurs dans sa totalité par le périmètre de protection rapprochée lors que le bassin est peu étendu et occupé majoritairement par de la forêt. Les PPI, outre le captage, peuvent couvrir des zones de pertes en relation directe avec le captage. Les PPR peuvent également entourer des PPI autres que celui du captage. Les PPR peuvent couvrir qu'une partie du bassin d'alimentation, sans que cette délimitation soit toujours argumentée ou alors, ils n'existent pas. L'extension des PPE traduit en quelque sorte la difficulté rencontrée avec l'application de périmètres de protection très étendus, de manière réaliste.

Face à ce constat, il est apparu nécessaire de formaliser une démarche, de développer une méthodologie de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques pouvant servir de base pour la délimitation des périmètres de protection. La méthode RISK a été développée, prenant en considération les méthodes de cartographie de vulnérabilité des eaux souterraines spécifiques ou non des aquifères karstiques. Cette méthode comprend 4 critères, permettant de caractériser la sensibilité du système aux contaminations ; ces critères reflètent au mieux la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques. La méthode proposée comprend 5 étapes, permettant d'aboutir à une carte de vulnérabilité globale d'un bassin d'alimentation reconnu. La méthode est à appliquer sur des systèmes karstiques pour lesquels un minimum de connaissance est requise, notamment sur la zone d'étude ou le bassin d'alimentation, ainsi que des données qualitatives ou quantitatives sur les débits et l'hydrogramme de la source. La méthode RISK ne propose pas une traduction automatique des classes de vulnérabilité aux périmètres de protection. Des scénarios peuvent être établis et peuvent être analysés du point de vue économique, avant de proposer des périmètres de protection. La carte de vulnérabilité constitue un outil indispensable sur lequel l'hydrogéologue agréé pourra fonder et argumenter sa délimitation des périmètres de protection.

La méthode RISK est une méthode qui est un outil pour des hydrogéologues praticiens, l'attribution des différentes classes pour les 4 critères nécessitant une connaissance hydrogéologique du fonctionnement du système ainsi qu'une approche naturaliste sur le terrain. Le système de pondération proposé peut également faire l'objet de modification, il n'est en aucun cas figé ; plusieurs systèmes de pondération à argumenter peuvent être testés tout en restant dans un système de pondération normé (somme des indices = 1).

La traduction des classes de vulnérabilité en périmètres de protection ne peut se faire automatiquement ; le passage au parcellaire est à prendre en compte, ainsi que des regroupements de zones de vulnérabilité similaire ou proche dans un secteur donné. L'évaluation économique de différentes options de périmètres de protection pourrait également être effectuée et servir d'arguments de choix ; elle pourrait permettre une meilleure acceptation des périmètres de protection et de leur contraintes selon les situations, auprès de la population.

Le guide méthodologique constitue un document de références pour les maîtres d'ouvrage, pour les bureaux d'étude ainsi que pour les hydrogéologues praticiens. Il permet de fixer un cadre méthodologique, qui peut être modulé en fonction des spécificités du captage à protéger (taille du bassin d'alimentation et occupation du sol, pression polluante actuelle ou à venir).

Cette étude contribue également aux réflexions et travaux en cours concernant les périmètres de protection des aquifères karstiques initiées par les agences de l'eau Rhône Méditerranée & Corse et Adour Garonne ; l'étude est réalisée par les bureaux Ginger Environnement de Limoges et SIEE de Montpellier).

9. Bibliographie

Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J. and Hackett G. (1987) - DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455 pp.

Association départementale des Maires du Doubs (2001) - « Protocole d'accord spécifique relatif à la protection des points de captage d'alimentation en eau potable et à l'indemnisation des servitudes consécutives à la mise en place des périmètres de protection », Version provisoire, juin 2001.

Benard J. (1985) - Economie Publique, Economica.

CG25 (2002) « Mise en place des périmètres de protection - Commune de Besançon - source d'Arcier » ; Notice explicative de la D.D.A.S.S. sur les contraintes liées à la protection des ressources en eau (document 4), Département du Doubs, avril 2002.

CG25 (2002) « Mise en place des périmètres de protection - Commune de Besançon - source d'Arcier » ; Evaluation économique liée à la protection des ressources en eau (document 5), Département du Doubs, avril 2002.

CG25 (2002) « Mise en place des périmètres de protection - Commune de Besançon - source d'Arcier » ; Document parcellaire (document 6), Département du Doubs, avril 2002.

CG25 (2002) « Mise en place des périmètres de protection - Commune de Besançon - source d'Arcier » ; Dossier d'enquête parcellaire (document 7), Département du Doubs, avril 2002.

Chachadi A.G. and Lobo Ferreira J.P. (2001) - Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method, Newsletter COASTIN N°4 March 2001.

Civita M. (1990) - La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all' inquinamento. Proc."1° Conv. Naz. Protez. e gestione Acque sotterr.: metodol., tecnol. e obiettivi", v. 3, Marano s. P. (Modena).

Clark-Labs (2000) - IDRISI : GIS and Image Processing. v32.02. Windows PC. Clark University. Worcester, USA.

COST ACTION 620 (2003) – Vulnerability and Risk mapping for the Protection of Carbonate (karst) aquifer (homepage)
<http://capella.unine.ch/chyn/pdf/FinalReportCOST620.pdf>

Desprats J-F., Marchal J.P., Pomares C. and Doerfliger N. (1998) - Voirie

départementale et la protection de la ressource en eau. En cours d'édition, BRGM.

Mettetal J-P. (1985) - Etudes préalables à la définition des périmètres de protection en milieu karstique. Exemple de la source d'Arcier, 6 p., 6 fig., document SRAE.

Doerfliger N. (1996) - Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping. Thèse 3ème cycle, Université de Neuchâtel, Suisse, 292 pp.

Dörfliger N. & Zwahlen F. (1998) - Practical Guide, Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK). – Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL): 56 p.; Bern.

Dreyfus M. & Chauve P. (1971) - Excursion hydrogéologique au marais de Saône et à la source du Lison. Un colloque d'hydrologie en pays calcaire.

European Water Directive (2000) - Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.

Foster S.S.D (1987) - Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy – In: Van Duijvenboden, W. & VAN WAEGENING, H.G. (eds) Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, TNO Committee on Hydrogeological Research, Proceedings and Information, 38: 69-86; The Hague.

Garrabé M. (1994) - Ingénierie de l'évaluation économique, Ellipses.

Gleyses G. and S. Loubier (2000) - Les coûts de mobilisation de la ressource en eau pour l'irrigation: Méthode de calcul et étude de cas. Montpellier, Cemagref division irrigation - Agence de l'eau RMC ; 268 p.

Goldscheider N., Klute M., Sturm S. & Hötzi H. (2000) - The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. – Z. angew. Geol., 46 (2000) 3: 157-166; Hannover.

GRAP (2003) - **Christian Barneoud et Nathalie Bouvet** : Captage de la source d'Arcier à Vaire-Arcier (25), Caractérisation des voies de circulation de l'eau dans et sur les sols agricoles, 22 p. GROUPE REGIONAL AGRONOMIE PEDOLOGIE, Chambre Régionale d'Agriculture de Franche-Comté.

Hölting B., Haertle T., Hohberger k.-h., Nachtigall K. H., Villinger E., Weinzierl W. & Wrobel J.-P. (1995) - Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Geol. Jb., C63: 5-24; Hannover.

J.O.R.F. (2003) « Arrêté du 29 septembre 2003 portant fixation du barème indicatif de la valeur vénale moyenne des terres agricoles en 2002 », Journal Officiel de la République Française du 26 octobre 2003.

J.O.R.F. (2004) - « LOI n° 2004-806 du 9 août 2004 relative à la politique de santé publique (1) », Journal Officiel de la République Française du 09 Août 2004.

Loubier S. (2003) - Gestion durable des aménagements d'hydraulique agricole: conséquences sur la tarification et les politiques publiques en hydraulique agricole, Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 1 - Cenagref UR Irrigation ; 334 p.

Mangin A. (1975) – Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse, Université de Dijon.

Margat J. and Suais-Parascandola M.F. (1987) - Mapping the vulnerability of groundwater to pollution, some lessons from experience in France. *In*: W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegeningh (Editors), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, The Hague, pp. 433-436.

Pearce D.W. and Markandia A. (1989) - L'évaluation monétaire des avantages des politiques de l'environnement. Paris, OCDE.

Petelet Giraud E., Dörfli N., Crochet P. (2000) - RISKE : Méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Applications aux systèmes des Fontanilles et Cent-Fonts (Hérault, France), Hydrogéologie, Vol. 4 - pp. 71-88 [Paru].

Préfecture du département du Doubs (2004) « Arrêté préfectoral n° 3316 », 8 juin 2004.

Suais M.F., Vinatier J.M. and Barat A. (1990) - Vulnérabilité des aquifères, recherche de critères cartographiques pertinents. Essai de cartographie automatique sur la plaine alluviale entre Rhône et Ain (01). R 30890 RHA 4S 90, BRGM.

Van Stempfort D., Ewert L., Wassenaar L. (1993) - Aquifer vulnerability index. A GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Jnl*, Vol.18, n° 1, pp.25-37.

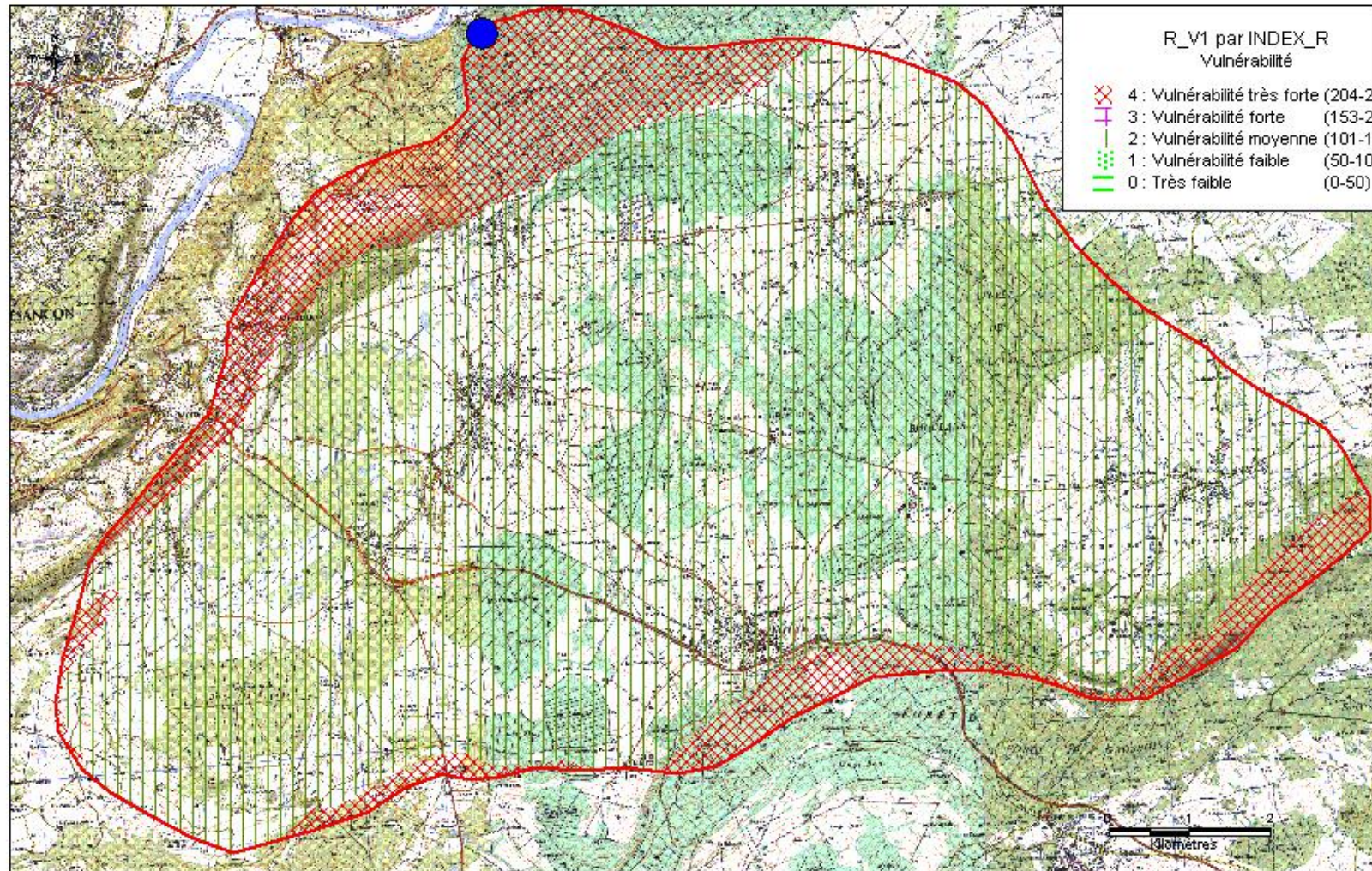
Vías J.M., Andreo B., Perles M.J., Carrasco F., Vadillo I. & Jiménez P. (2002) - Preliminar proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. *In*: Karst and Environment (F. Carrasco, J.J. Durán and B. Andreo, Eds.), 75-83.

Vrba J. & Zaporozec A. [eds.] (1994) - Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. – International Contributions to Hydrogeology (IAH), 16: 131 p.; Hannover.

Annexe 1

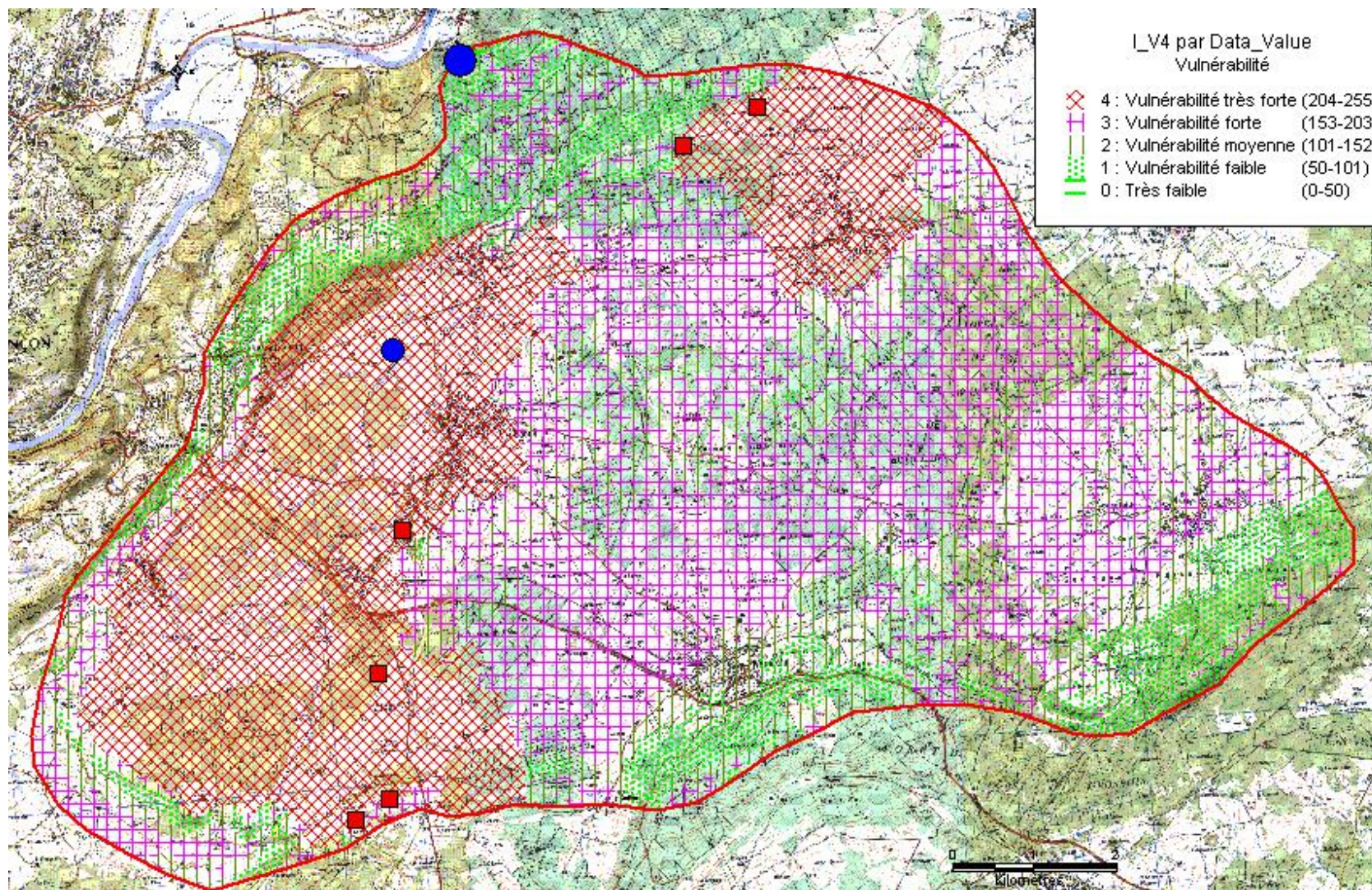
Carte des critères de vulnérabilité pour Arcier

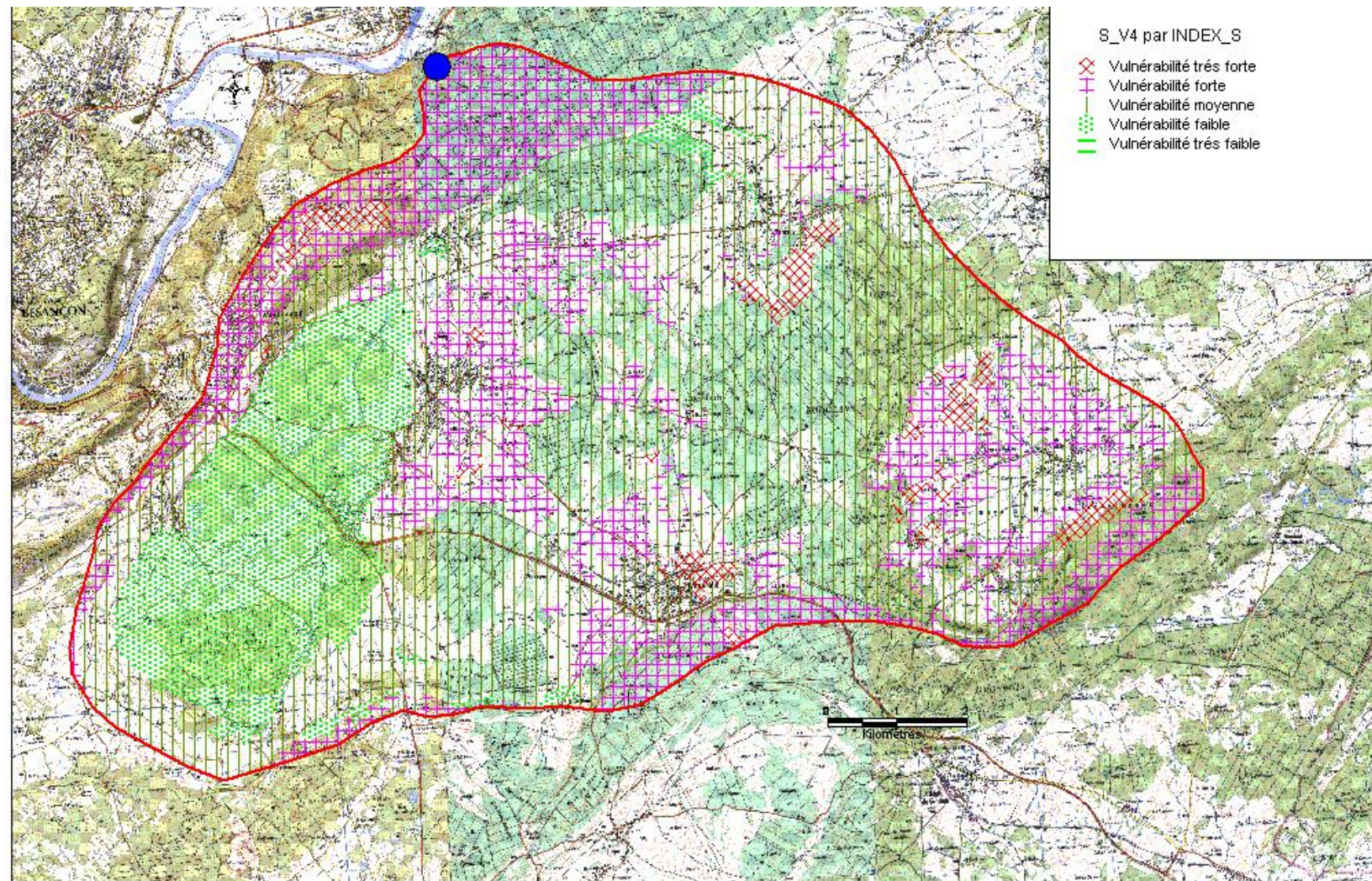
Critère R : Roche



● SOURCE D'ARCIER

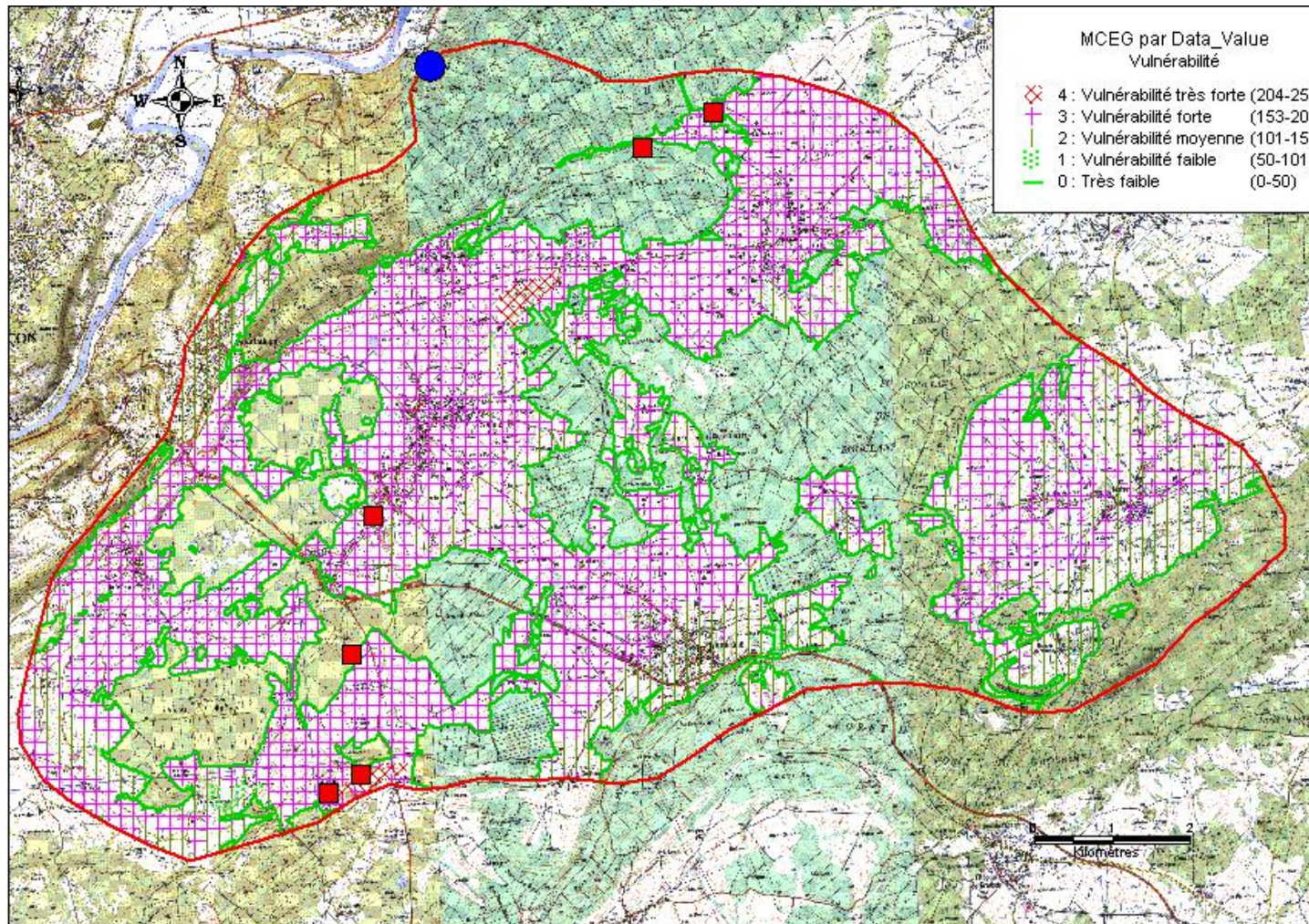
Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques





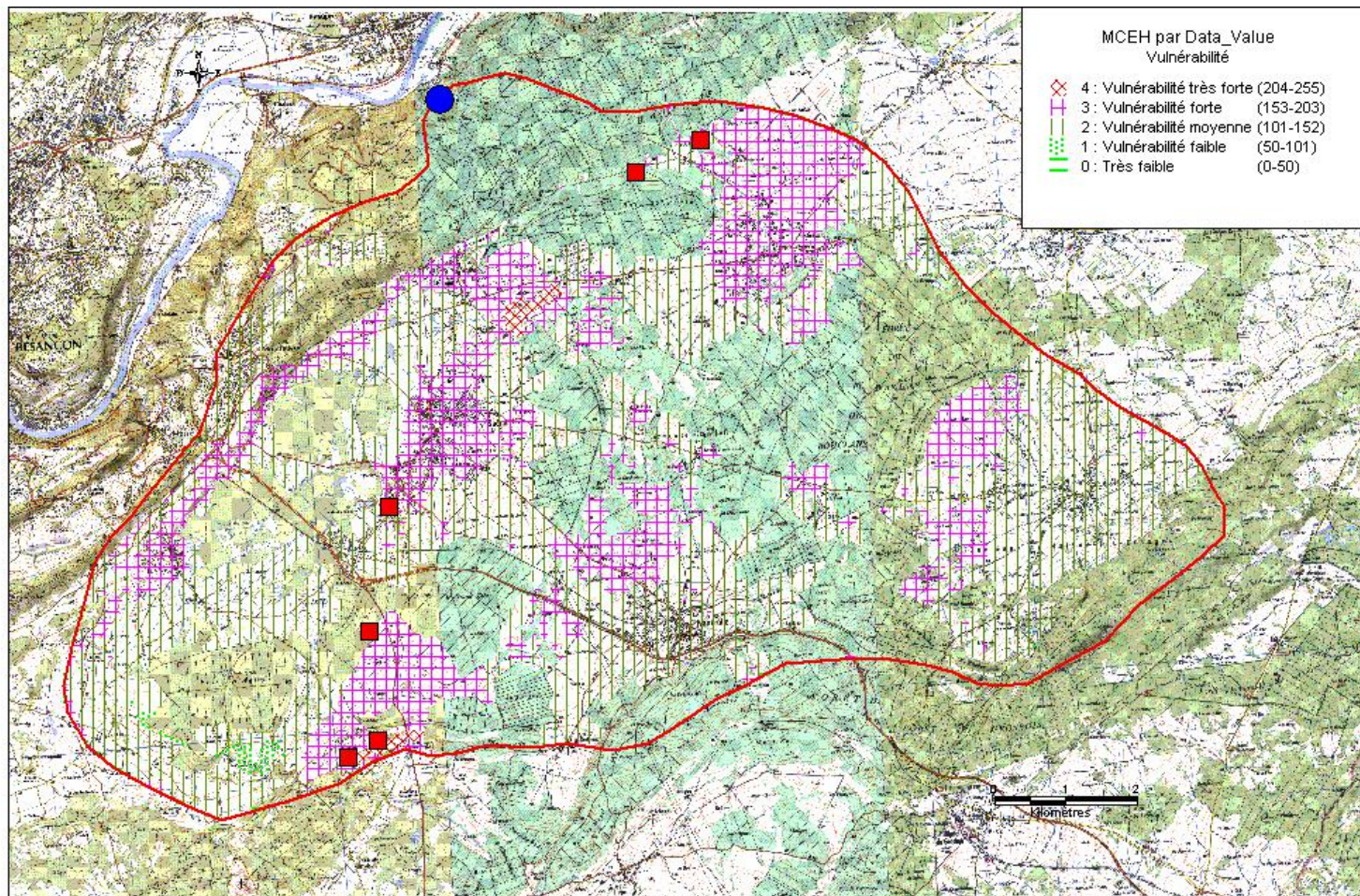
Annexe 2

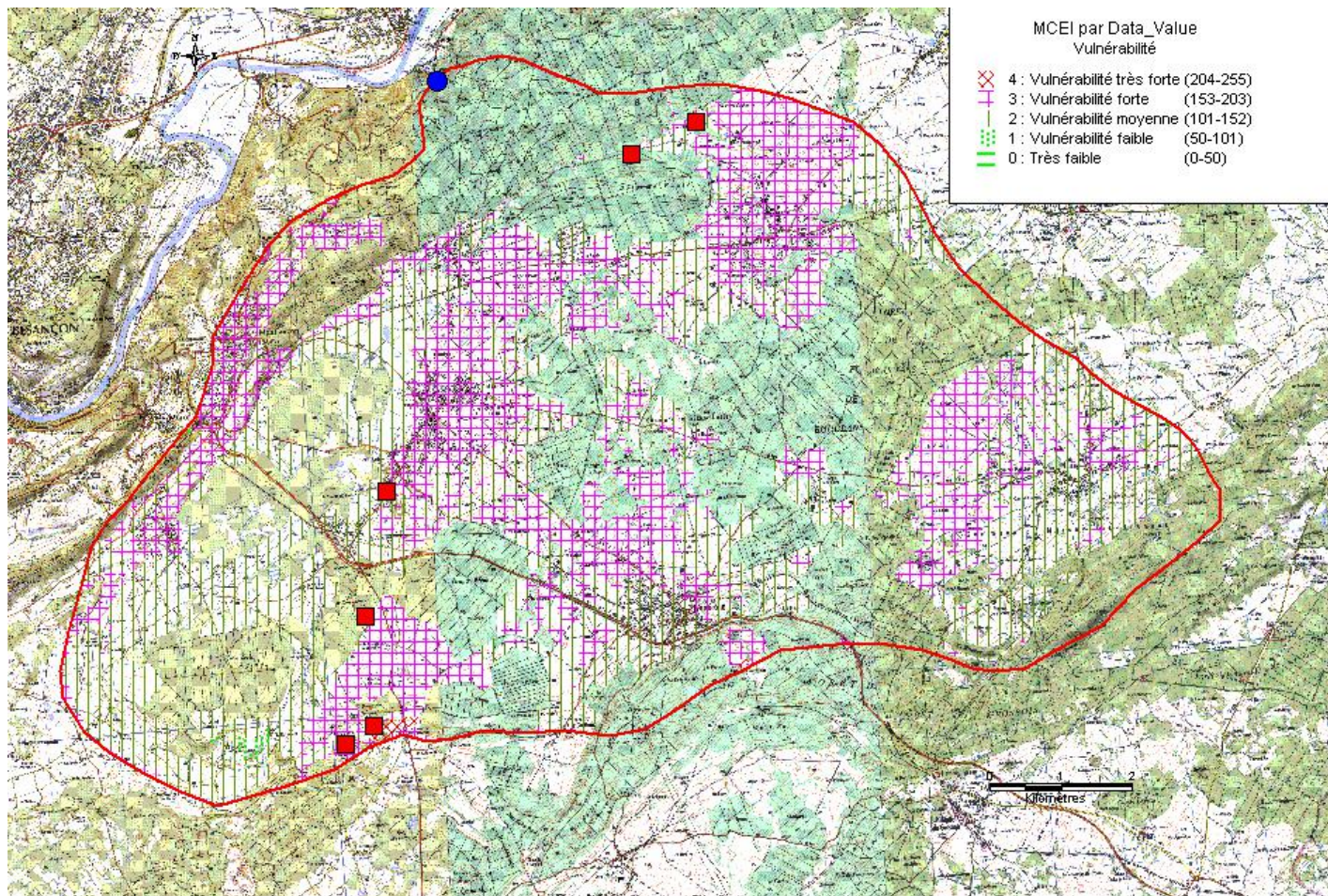
Carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation de la source d'Arcier



- SOURCE D'ARCIER
- PERTES

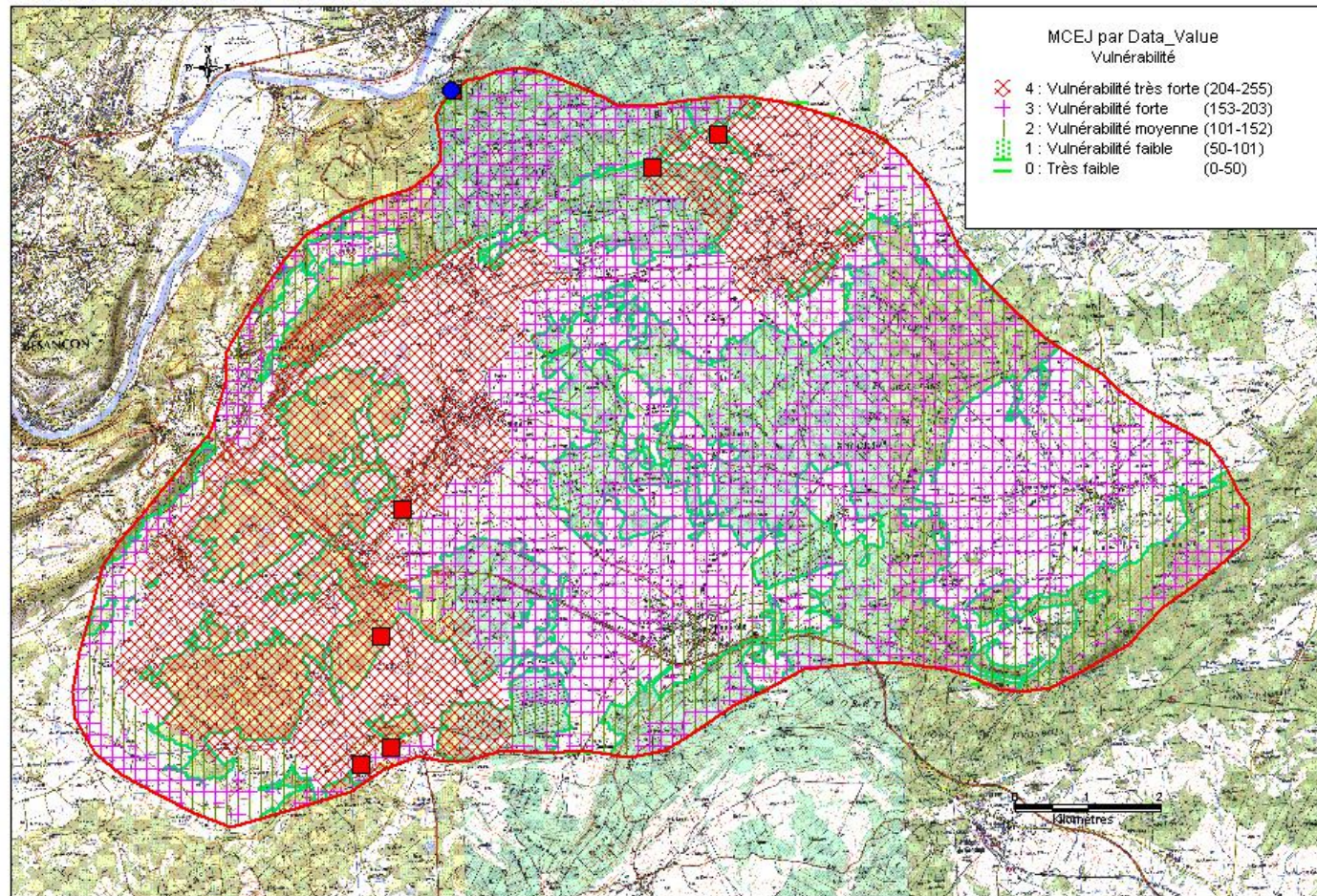
CAS 1 : Vulnérabilité globale évaluée par :
 $(0.2 K) + (0.1 R) + (0.4 I) + (0.1 S) + (0.2 E)$





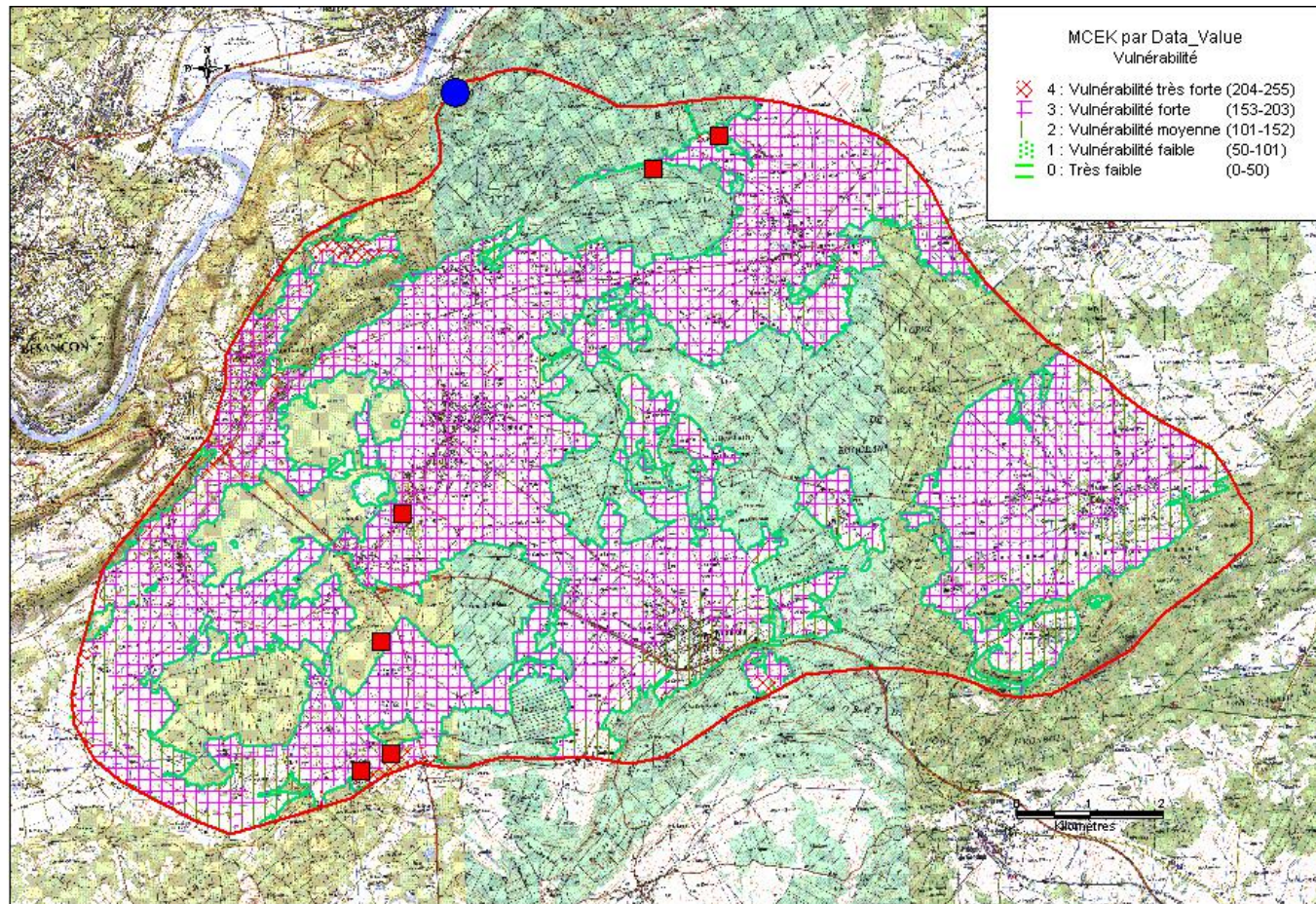
- SOURCE D'ARCIER
- ★ PERTES

CAS 3 : Vulnérabilité globale évaluée par :
 $(0.2 K) + (0.2 R) + (0.2 I) + (0.2 S) + (0.2 E)$



- SOURCE D'ARCIER
- PERTES

CAS 4 : Vulnérabilité globale évaluée par :
(0.3 K) + (0.1 R) + (0.5 I) + (0.1 S) + (0.0 E)



- SOURCE D'ARCIER
- PERTES

CAS 5 : vulnérabilité globale évaluée par :
 $(0.25 K) + (0.25 R) + (0.25 I) + (0.25 S) + (0.0 E)$

Annexe 3

Liste des personnes contactées pour l'analyse économique

| | |
|--------------------------------|--|
| 1. D. Mourot | Ville de Besançon |
| 2. J-P. Hass | Ville de Besançon |
| 3. Maitre E. Kleber | Notaire |
| 4. C. Berger | CA25 |
| 5. S. Houttement directeur) | Association Départementale des maires du Doubs (ancien |
| 6. Mr CORGINI | Agence foncière du Doubs |
| 7. B. Daniel | DDASS 25 |
| 8. L. Faguerazi | DDAF25 |
| 9. Mr LIBAUZE | Bureau d'étude "Science et environnement" |
| 10. G. Mathieu | CG25 |
| 11. Mr CORGINI | Agence foncière 25 |
| 12. Melle D. Durand | CG25 |
| 13. Mme R. Toudale | CA25 |
| 14. Mr Marnier | Services fiscaux |
| 15. Mr Billant | Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) - Agence Languedoc-Roussillon |
| 16. Mr Hurtevent | Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) - Méditerranée |
| 17. Mr Bailles | Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) - Méditerranée |
| 18. Mr Gruse | Réseaux Ferrés de France - Franche-Comté |

Annexe 4

Guide méthodologique au format pdf (CD-Rom)

Centre scientifique et technique
Service Eau / Unité RMD
1039, rue de Pinville
34000 Montpellier– France – Tél. : 33 (0)4 67 15 79 90