

## Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines karstiques et du risque de contamination – Adaptation et application des concepts européens en Suisse

*par Michael Sinreich \*, David Clavien \*\*, Ronald Kozel \*\* & François Zwahlen \**

### RESUME

Dans beaucoup de régions européennes, les aquifères karstiques constituent une ressource précieuse pour l'alimentation en eau potable. La protection des eaux souterraines karstiques est donc de plus en plus prise en considération pour l'intérêt public et dans la recherche scientifique. L'action européenne COST 620 a pris en compte l'importance des aquifères karstiques grâce à la création d'un concept adéquat pour l'évaluation de la vulnérabilité et du risque dans un tel milieu. La démarche prévoit de déterminer successivement (i) les contaminations existantes et potentielles (dangers), (ii) leur transport dans le sous-sol (vulnérabilité), et (iii) les conséquences qui peuvent découler d'un événement de contamination (sensibilité). Une combinaison des deux premiers paramètres définit une intensité de risque, tandis que l'ensemble des trois paramètres permet d'évaluer un risque total.

La démarche est illustrée par une application à un bassin karstique dans le Jura suisse en considérant, d'une part, un contaminant conservateur et, d'autre part, le nitrate et les germes coliformes comme contaminants spécifiques potentiellement réactifs. Les cartes de danger montrent les sources de contamination potentielles réparties sur le bassin versant. La vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique sont cartographiées par une méthodologie systématique qui considère les processus d'atténuation dans les diverses couches entre la surface et respectivement la nappe ou le captage exploité. Les cartes de risque sont établies par une superposition des cartes de vulnérabilité et de danger, et représentent l'intensité d'une contamination potentielle. Ces résultats peuvent être validés, soit ponctuellement par des essais de traçage, soit globalement pour le bassin par les caractéristiques des sources karstiques. Enfin, l'intégration de la sensibilité du système karstique permet de déduire le risque total d'un bassin, en évaluant la dangerosité d'un contaminant particulier et la valeur d'une ressource en eau karstique. Cette étude est la première réalisation complète de la

---

\* Centre d'Hydrogéologie (CHYN), Université de Neuchâtel, Rue Emile-Argand 11, CH-2007 Neuchâtel

\*\* Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), CH-3003 Bern-Ittigen

démarche européenne, intégrant le développement des cartes de vulnérabilité spécifique et de risque spécifique ainsi que la considération des aspects socio-économiques.

#### **MOTS-CLES**

Protection des eaux souterraines, cartographie de vulnérabilité, risque, Action COST 620, karst, Jura, Suisse

#### **ZUSAMMENFASSUNG**

Grundwasser aus Karstgesteinen stellt in vielen Regionen Europas eine bedeutende Trinkwasserressource dar, deren nachhaltiger Schutz zunehmend im Blickpunkt öffentlichen und wissenschaftlichen Interesses steht. Das europäische Koordinierungsprogramm Aktion COST 620 trägt diesem Umstand Rechnung und hat einen einheitlichen Ansatz zur umfassenden Vulnerabilitäts- und Risikobewertung von Karstaquifern hervorgebracht. Dieses Konzept sieht eine gestaffelte Vorgehensweise vor hinsichtlich (i) der Freisetzung von Schadstoffen (Gefahrenherde), (ii) des Schadstoffverhaltens im Untergrund (Vulnerabilität), und (iii) der Konsequenzen, die sich aus einer etwaigen Beeinträchtigung des Systems ergeben können (Anfälligkeit). Die gemeinsame Betrachtung der beiden ersten Parameter liefert eine Risikointensität, während die zusätzliche Einbeziehung des dritten Parameters ein Gesamtrisiko definiert.

Das Gesamtkonzept wird unter Anwendung auf ein Karstgebiet im Schweizer Jura erläutert, und zwar sowohl hinsichtlich eines konservativen Schadstoffs als auch schadstoffspezifisch für Nitrat und coliforme Keime. Gefahrenkarten erfassen zunächst die räumliche Verteilung der potentiellen Schadstoffquellen im Einzugsgebiet der Karstquellen. Die intrinsische und spezifische Vulnerabilität wird dann mittels einer einheitlichen Methodik kartiert, welche die Retentionsprozesse in den einzelnen Schichten zwischen Geländeoberfläche und Karstwasserspiegel bzw. Quellaustritt erhebt. Durch Kombination der Karten für die Gefahrenherde und die Vulnerabilität werden Risikokarten erstellt, welche als Intensität einer potentiellen Quellverunreinigung verstanden werden können. Eine punktuelle und gesamtheitliche Validierung der Ergebnisse ist mittels Markerversuchen und der Aufnahme von Quellparametern möglich. Schliesslich lässt sich unter Einbeziehung der Anfälligkeit des Karstsystems, wofür das Gefährdungspotential eines spezifischen Schadstoffes sowie die Bewertung der Ressource Karstwasser herangezogen werden, das Gesamtrisiko im Einzugsgebiet ableiten. Die vorliegende Fallstudie stellt die erste vollständige Umsetzung des gesamt-europäischen Ansatzes dar, einschliesslich spezifischer Vulnerabilitäts- und Risikokarten sowie Berücksichtigung sozio-ökonomischer Aspekte.

#### **STICHWORTE**

Grundwasserschutz, Vulnerabilitätskartierung, Risikobetrachtung, Aktion COST 620, Karst, Jura, Schweiz

#### **ABSTRACT**

Groundwater from karst aquifers is an essential drinking water resource in many European regions and karst groundwater protection has become an important issue, both in terms of public perception and for scientific research. The European COST Action 620 provides a comprehensive approach on

”

vulnerability and risk assessment for carbonate aquifers. The approach employs a three-tiered procedure that takes the following into account : (i) contaminant release (hazards), (ii) contaminant behaviour in the subsurface (vulnerability), and (iii) consequences that may arise from a potential contamination event (sensitivity). Combining the two first parameters evaluates a risk intensity, whereas all three parameters together define a total risk.

The pan-European approach has been applied to a karst basin in the Swiss Jura Mountains, for both conservative and more specifically for potentially reactive contaminants (nitrate and coliforms). Hazard maps illustrate spatial distribution of potential contaminant release in the catchment. Intrinsic and specific vulnerability are mapped using a standard methodology, which considers the attenuation processes in the different layers between land surface and the karst water table, or karst springs respectively. Risk maps, which describe the intensity of contamination, can be compiled by combining these hazard and vulnerability maps. Point and global validation of the results is possible by means of artificial tracer testing and measurement of spring parameters. Ultimately, the risk sensitivity of the karst system can be incorporated into the assessment process to provide final risk maps. Risk sensitivity is evaluated by considering the health hazard of a specific contaminant and karst groundwater resource value. This case study presents the first complete implementation and application of all modules of the pan-European approach, including the development of specific vulnerability and risk maps as well as the consideration of socio-economic aspects.

#### **KEYWORDS**

Groundwater protection, vulnerability mapping, risk assessment, COST Action 620, karst, Jura Mountains, Switzerland

## **Introduction**

### **Situation en Suisse**

En Suisse, environ 15% de l'eau potable provient des eaux souterraines karstiques. Ces eaux sont originaires de formations carbonatées qui constituent à peu près un cinquième de la surface du pays. Les calcaires affleurent principalement le long de la chaîne jurassienne et au nord des Alpes. L'exploitation des eaux souterraines karstiques s'effectue notamment par l'intermédiaire de sources captées. Les aquifères karstiques constituent très souvent la seule ressource en eau potable dans ces régions manquant de ressources alternatives. Ces aquifères nécessitent donc une stratégie de protection appropriée contre les contaminations superficielles pour assurer une exploitation durable d'eau de bonne qualité, tout en minimisant les conflits liés aux restrictions concernant l'occupation du sol.

En général, l'écoulement des eaux souterraines en milieu karstique est caractérisé par une infiltration et un transport le long des conduits karstiques rapides. Ces systèmes sont donc relativement vulnérables à une contamination qui a lieu dans le bassin versant. Les contaminants potentiels peuvent arriver à la source sans que les eaux infiltrées ne séjournent suffisamment longtemps dans le système pour être épurées de manière naturelle

avant d'être captées. Par contre, pour les aquifères moins karstifiés ou ceux qui sont protégés par une couche superficielle, une moins grande vulnérabilité est possible. Le recours à des méthodes multicritères permet de prendre en compte ces contrastes de vulnérabilité dans le bassin versant. En Suisse, la méthode EPIK est recommandée pour l'application de l'ordonnance sur la protection des eaux (DOERFLIGER & ZWAHLEN 1998, TRIPET *et al.* 2000). Celle-ci prend en compte les paramètres 'infiltration', 'couches protectrices', 'epikarst' et 'réseau karstique' comme critères essentiels pour cartographier la vulnérabilité des surfaces et pour finalement délimiter les zones de protection (DOERFLIGER *et al.* 1999).

### **Perspective européenne**

A l'échelle européenne, une action coordonnée a été lancée en 1997 pour reprendre le concept de la vulnérabilité et l'intégrer dans un cadre plus complet du point de vue de la gestion du risque. Cette action a été menée dans le cadre du programme COST de la Commission Européenne, établi et financé pour renforcer la Coopération Européenne en Science et Technologie. L'Action COST 620, intitulée 'Cartographie de la vulnérabilité et du risque pour la protection des aquifères en milieu karstique' était un forum réunissant des experts de 16 pays européens, actifs dans le domaine de la recherche, de l'administration ou de la pratique. L'Action COST 620 s'est récemment terminée et propose comme résultat des concepts généraux et des recommandations pour une gestion des terrains karstiques (ZWAHLEN 2004). La Suisse a été représentée dans cette action par le Centre d'Hydrogéologie de l'Université Neuchâtel (CHYN) et par l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG). Leurs activités dans ce cadre ont été financées par l'Office fédéral de l'éducation et de la science (OFES).

L'approche COST 620 est basée sur une démarche itérative afin d'évaluer le risque de contamination d'un aquifère, en tenant compte des caractéristiques particulières d'un milieu karstique. Elle définit des concepts et des principes qui sont considérés comme universels et applicables à toute la gamme de karst en Europe. Ces concepts doivent être mis en application par des méthodes concrètes adaptées aux conditions géologiques et hydrologiques régionales. Trois aspects différents sont distingués et ceux-ci correspondent à trois étapes d'évaluation consécutives (ZWAHLEN 2004, figure 1).

- *L'origine* d'une contamination traduit les dangers qui se trouvent à la surface ou près de la surface du bassin. Les *dangers* sont liés aux activités industrielles, à l'agriculture ou à l'infrastructure.
- *Le trajet* correspond au cheminement de l'eau et d'un contaminant lié à un danger, entre la surface et l'exutoire, en traversant les couches du sous-sol. Les effets du trajet correspondent à la *vulnérabilité* d'un système hydrogéologique.
- *L'objectif* d'une protection contre une contamination peut être soit la nappe (ressource), soit un point d'extraction (source ou puit). L'importance de l'objectif peut être décrite par sa *sensibilité* socio-économique par rapport à une contamination potentielle.

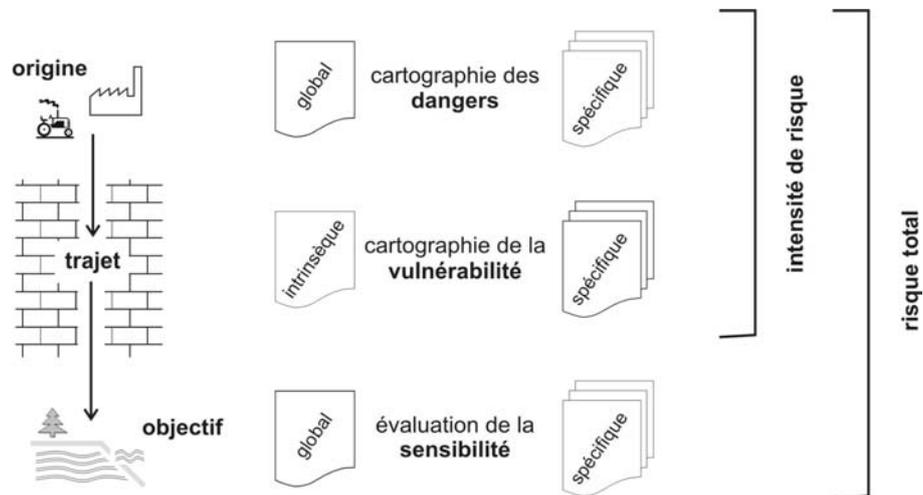


Figure 1 : Concept intégré de COST 620 pour l'évaluation du risque des eaux souterraines karstiques vis-à-vis d'une contamination.

L'évaluation, pour un système karstique, du risque dû à une contamination implique une procédure en plusieurs étapes (figure 1). Dans un premier temps, il faut identifier les *dangers* comme l'origine des contaminations potentielles. Une deuxième étape, évaluée sur la base des informations hydrogéologiques, s'occupe de la cartographie de la *vulnérabilité* de l'eau souterraine. Une combinaison des dangers et de la vulnérabilité, par superposition des cartes correspondantes, permet une analyse de l'*intensité de risque*, tandis que la combinaison de ces deux cartes avec la *sensibilité* donne ce que l'on appelle le *risque total* (DALY *et al.* 2004).

Une carte de l'intensité de risque représente donc l'intensité d'un impact potentiel sur un objectif de protection. Une carte de risque total représente l'importance d'un tel impact, en intégrant également la sensibilité de l'objectif, soit les conséquences qu'un événement de contamination peut avoir quant à l'aspect socio-économique. Un logiciel du type système d'information géographique (SIG) permet de combiner facilement les différentes cartes correspondantes (figure 12). Cette approche interdisciplinaire implique l'intégration des informations concernant l'utilisation du sol, le transport de contaminants et l'exploitation des ressources pour faciliter la gestion de l'eau.

La réalisation de la procédure précédente peut être effectuée, soit de manière générale pour un contaminant conservateur que l'on appelle *contaminant global*, soit de manière plus approfondie pour un contaminant particulier potentiellement réactif, appelé *contaminant spécifique*. Dans le premier cas, les dangers potentiels de tous les contaminants sont regroupés en un *danger global*. Un tel danger global correspondrait à un contaminant fictif non-réactif; le trajet dans les couches du sous-sol étant donc indépendant de sa nature (*vulnérabilité intrinsèque*). Par contre, dans le second cas, différents types de contaminant

sont cartographiés individuellement. Dans une telle procédure, on considère les propriétés d'une substance et son comportement spécifique dans le sous-sol (*vulnérabilité spécifique*). Il est donc possible d'avoir plusieurs cartes spécifiques par chaque étape, celles-ci correspondant au nombre de contaminants pris en compte, tandis qu'il n'y a qu'une seule carte par étape pour la procédure d'évaluation globale (figure 1).

Les concepts COST 620 pour l'évaluation et la cartographie des dangers (DE KETELAERE & DALY 2004), de la vulnérabilité intrinsèque (DALY *et al.* 2002), de la vulnérabilité spécifique (SINREICH *et al.* 2004 a, b) et du risque (HÖTZL 2004) ont été appliqués sur différents sites européens (ZWAHLEN 2004). Pour la Suisse, le bassin d'alimentation des sources de Vaulion (canton de Vaud, Jura plissé) a été choisi comme site test. Précisons que l'exemple de Vaulion est la première adaptation et application complète de toute la démarche européenne, prenant également en compte le développement des cartes de vulnérabilité spécifique et de risque spécifique, ainsi que la considération des aspects socio-économiques.

### **Description du site**

Le site de Vaulion se trouve en Suisse occidentale et fait partie de l'arc jurassien (figure 2). Le cadre géologique est celui d'un synclinal formé par des calcaires et des marnes crétacées. L'aquifère karstique est constitué d'une partie supérieure (Barémien) et d'une partie inférieure (Hauterivien). Les marnes hauteriviennes d'une épaisseur d'environ 20 m forment la base de l'aquifère (AUBERT & DREYFUSS 1963). Des dépôts quaternaires, moraine et fluvioglaciaire, couvrent environ 20% de la surface et atteignent une épaisseur maximale de 10 m. La moraine est assez argileuse et moins perméable que le fluvioglaciaire au sud du bassin, qui est composé de sable et de gravier. Une couverture de sol entre 10 et 100 cm est présente sur l'ensemble du bassin.

Les calcaires crétacés sont bien karstifiés avec un régime d'écoulement préférentiel important. L'aquifère alimente cinq sources principales, dont trois sont captées et utilisées par la commune de Vaulion pour l'eau potable (Trou à Bonnard, Cul du Nozon et Américain). Les sources sont situées dans un vallon creusé le long de l'axe du synclinal de Vaulion et drainent un bassin d'une superficie de 3.5 km<sup>2</sup> environ. L'importance hydrogéologique de l'aquifère se manifeste par l'existence d'un réseau spéléologique qui a été exploré jusqu'à une longueur de 1 km. La structure tectonique du synclinal et les observations spéléologiques impliquent qu'il s'agit d'un système karstique peu profond (PERRIN 2002). Des petits aquifères perchés sont développés dans les sédiments fluvioglaciaires. Quatre différents sous-systèmes sont distingués au point de vue hydrogéologique, notamment le sol, les dépôts quaternaires, le karst non-saturé et le karst saturé. Malgré l'affleurement du karst sur la plupart du bassin, l'infiltration des eaux météoriques s'effectue principalement de manière diffuse, bien que le sol de faible épaisseur puisse permettre des passages préférentiels.

Le site de Vaulion est situé dans une région marquée par des activités agricoles. A peu près deux tiers de la surface sont des pâturages ainsi que des champs et un tiers est recouvert de forêt. Le bassin a été choisi comme site test suisse pour l'adaptation des concepts établis

dans le cadre de COST 620. Il est géographiquement clairement délimité, bien étudié dans ses aspects hydrogéologiques, et différencié dans sa géologie quaternaire. Les sources sont utilisées pour l'alimentation en eau potable et leur qualité est menacée par des impacts dus à l'agriculture sur le bassin versant. Les informations sur l'hydrogéologie locale ont été obtenues par des études récentes (CSD 1992, PERRIN 2002, DIGOUT 2002, CLAVIEN 2003) et les investigations actuelles de A. Pochon. Cela permet d'appliquer de manière constructive la démarche européenne grâce à une connaissance approfondie du bassin. Les résultats peuvent servir à la commune de Vaulion pour améliorer la qualité de l'eau de ses sources captées.

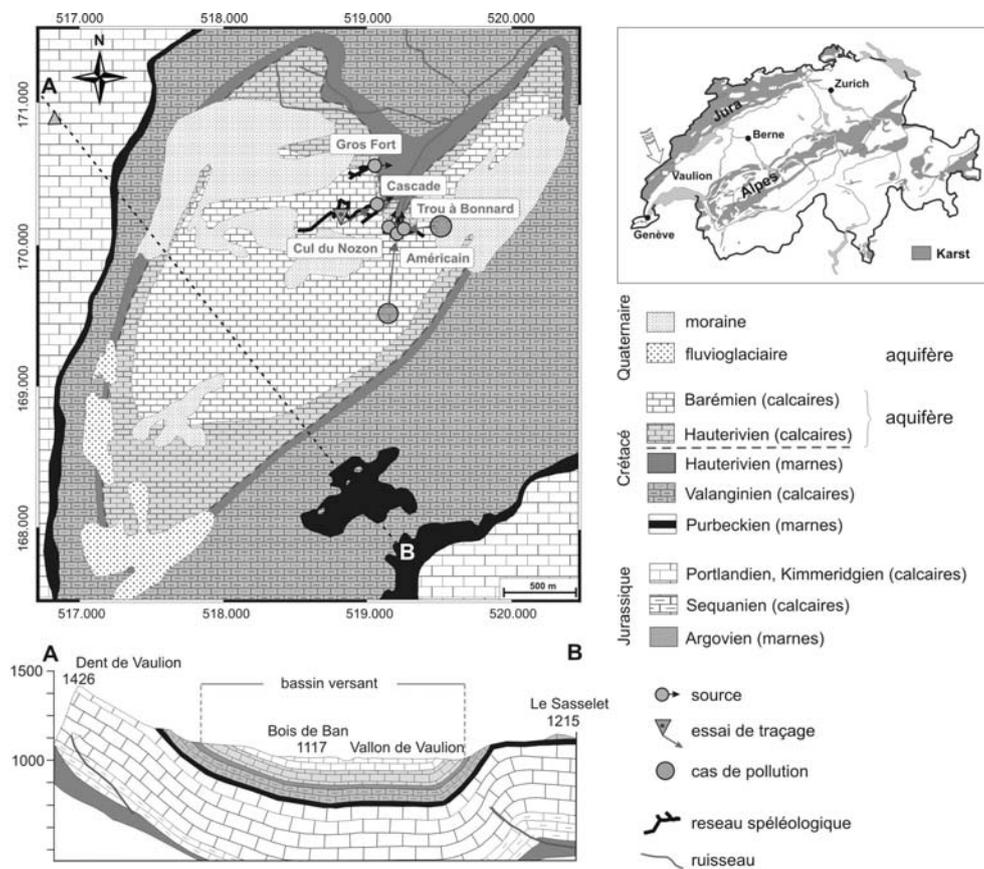


Figure 2 : Situation et contexte géologique du bassin de Vaulion, essai de traçage et cas de pollution avec leurs liaisons aux sources (POCHON et al. 2004).

## **Cartographie des dangers**

### **Méthodologie COST 620**

La qualité d'une ressource en eau souterraine est potentiellement menacée si des dangers existent dans le bassin d'alimentation correspondant. Le but d'une cartographie de dangers est de détecter ces aléas et notamment leur importance et leur distribution spatiale. Une telle cartographie et la classification des dangers est faite d'après la méthodologie de COST 620 (DE KETELAERE & DALY 2004). Celle-ci est valable pour un contaminant global et elle est modifiée pour des contaminants spécifiques en répondant aux mêmes règles. Les cartes de dangers sont élaborées avec, tout d'abord, la simple localisation géographique des dangers qui sont ensuite classifiés selon un indice de danger.

Un danger est défini comme l'origine potentielle d'une contamination prenant place sur une surface donnée et résultant des activités humaines affectant l'environnement. La méthodologie européenne pour l'évaluation qualitative des dangers se réfère à un danger global. L'impact possible des dangers sur l'eau souterraine peut varier considérablement, et pour cela, différentes étapes sont prises en compte. La méthodologie COST 620 pour la cartographie des dangers globaux implique la prise en considération de trois paramètres.

- L'indice de toxicité diffère selon les divers types de dangers. Les valeurs ont été fixées par un groupe d'experts à l'aide d'un système de pondération, et sont distribuées avec une gamme de 0 (pas nuisible) à 100 (très nuisible).
- L'indice de quantité compare les dangers du même type. La valeur de cet indice varie entre 0.8 (basse) et 1.2 (haute) et doit être estimé par l'utilisateur de la méthode.
- L'indice de probabilité considère que la réalisation d'une contamination peut être accidentelle. Cet indice peut varier entre 0 (réalisation de contamination exclue) et 100 (contamination réalisée).

Un indice de danger, calculé par combinaison multiplicative des trois indices préliminaires, décrit le degré de nuisance de chaque aléa. Cet indice peut varier entre 0 et 120, et il est subdivisé en cinq classes de danger entre 'très faible' et 'très fort'.

### **Inventaire des dangers**

La plupart des dangers dans le bassin de Vaulion proviennent du secteur agricole. D'autres dangers mineurs sont liés aux habitations et à l'infrastructure. Les dangers industriels sont minimes, ce qui produit une fourchette de valeurs assez modérées. Les dangers existants sont de nature diffuse (pâturages, épandage de purin), linéaire (routes, canalisation d'eaux usées) ou ponctuelle (citernes à mazout, fosses à purin, étables, décharge, gravière etc.). Une cartographie des dangers a été réalisée pour l'ensemble du bassin (CLAVIEN 2003). Pour les dangers linéaires et ponctuels, une zone tampon est définie autour du danger reconnu. En cas de dangers se recoupant, le danger avec l'indice supérieur est considéré.

Le danger global sur le bassin s'avère, en général, très faible à faible sur les parcelles agricoles et varie en fonction de l'intensité d'exploitation (figure 3). Certaines fermes sont caractérisées par un danger moyen. Une bonne partie de la zone en très faible danger est due à une couverture forestière avec une relative absence de danger potentiel.

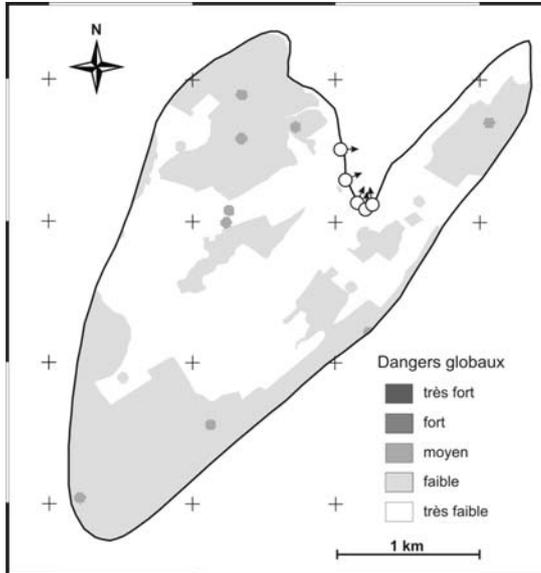


Figure 3 : Carte de danger global.

### Dangers spécifiques

La méthodologie COST 620 pour la cartographie des dangers globaux n'est pas valable si on veut différencier entre des contaminations particulières résultant de dangers spécifiques. Par contre, elle peut être modifiée en suivant la même logique mais en considérant un contaminant spécifique au lieu d'un contaminant global. Cela peut être réalisé en estimant semi-quantitativement la masse d'un contaminant spécifique qui peut potentiellement être dégagé. Comme toutes les classes de danger spécifique traitent le même type de contaminant, la toxicité n'est plus prise en compte comme paramètre d'évaluation. La toxicité est incluse dans le cadre de l'évaluation de la sensibilité (tableau 1). La quantité de contaminant et la probabilité d'un événement sont toutefois les critères essentiels pour ce type d'évaluation.

Deux types de contaminants ont été choisis pour l'adaptation de la méthodologie au site de Vaulion. Les bassins agricoles sont très souvent exposés au nitrate et aux germes microbiologiques pathogènes, comme le montrent les bactéries coliformes utilisées comme indicateur de pathogènes. Des concentrations élevées en nitrate sont souvent détectées dans les bassins karstiques en cas d'agriculture intensive (COXON 1999). L'origine du nitrate est liée à l'utilisation d'engrais de synthèse et d'engrais de ferme. En cas d'utilisation d'engrais à long terme, on observe très souvent des concentrations élevées dans l'eau, et cela de manière permanente. Une autre problématique bien connue en milieu karstique est la dégradation de la qualité d'eau due à la bactériologie. Une relation entre l'épandage de purin et la qualité des eaux des sources karstiques est souvent constatée. Celle-ci est particulièrement liée aux événements pluvieux (CELICO *et al.* 2004) et également à la

variabilité saisonnière (PERRIN *et al.* 2001). Les autres dangers concernant ce type de contamination correspondent aux pâturages et à des fuites de canalisation. Les pesticides, qui représentent un problème en présence d'agriculture intensive, jouent un rôle mineur à Vaulion, où le type d'agriculture est extensif.

Une classification avec cinq classes de danger spécifique a été élaborée pour chaque type de contaminant (CLAVIEN 2003). La masse du contaminant pour tous les dangers est estimée de façon semi-quantitative. L'avantage de cette évaluation est que l'on peut cumuler les différents dangers d'un contaminant spécifique en les additionnant. La gamme des classes est définie dans une perspective relative, ce qui signifie que les résultats sont comparables d'un site à l'autre, même si leurs proportions en contaminant sont très différentes.

La figure 4 représente la répartition des émissions diffuses en nitrates et en coliformes qui coïncide principalement avec la géométrie des parcelles. Les dangers ponctuels sont liés aux fermes. Les coliformes sont représentés par des classes supérieures en raison de la forte densité de bétail dans la région de Vaulion. Les deux cartes montrent des contrastes assez semblables avec des intensités généralement plus élevées pour les coliformes, ceci correspond au fait que les deux contaminants sont générés par l'activité agricole. Un danger très faible est attribué aux surfaces forestières du milieu du bassin. Les autres dangers spécifiques ont une influence mineure sur le bassin de Vaulion. A signaler cependant une concentration très élevée en chlorure et en sodium lors des crues à la Cascade dont l'origine est probablement due au salage de la route juste en amont de la source.

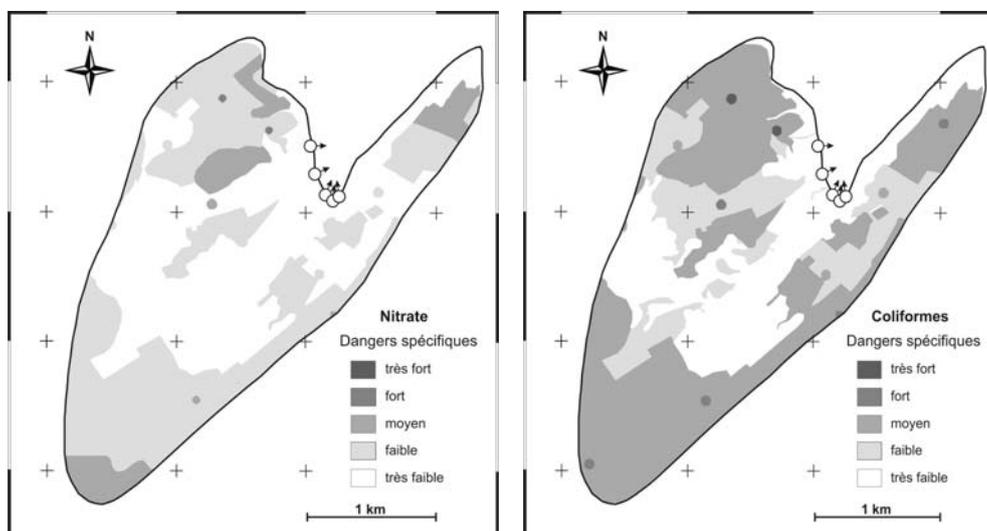


Figure 4 : Cartes de danger spécifique pour le nitrate et pour les coliformes.

## Cartographie de la vulnérabilité

### Concept COST 620

L'action COST 620 est basée sur le concept de la vulnérabilité, un terme qui décrit l'absence de protection inhérente au système karstique vis-à-vis d'une contamination externe. Deux différents types de vulnérabilité sont définis (DALY *et al.* 2002). La vulnérabilité intrinsèque est la susceptibilité générale des eaux souterraines aux contaminations générées par les activités humaines. Elle prend en compte les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques du milieu naturel. Les cartes de vulnérabilité intrinsèque fournissent une vue générale de la vulnérabilité sans tenir compte des effets d'atténuation supplémentaire dérivant des propriétés spécifiques des contaminants. Par contre, la vulnérabilité spécifique définit la susceptibilité des eaux souterraines à un type de contaminant particulier ou à un groupe de contaminants de comportement identique. Elle prend également en compte les propriétés physiques et chimiques d'un contaminant spécifique et les processus qui en résultent. Les cartes de vulnérabilité spécifique contiennent plus d'informations que les cartes de vulnérabilité intrinsèque, car elles fournissent une image plus détaillée du potentiel de propagation de chaque contaminant.

L'approche européenne définit quatre facteurs (C, O, K, P) pour décrire la vulnérabilité intrinsèque (DALY *et al.* 2002), plus un cinquième (S) pour caractériser la vulnérabilité spécifique (SINREICH *et al.* 2004a).

Le facteur C tient compte de la possibilité d'un déplacement latéral superficiel et d'une concentration de l'écoulement vers des points d'infiltration préférentiels.

Le facteur O désigne la fonction protectrice de toutes les couches qui se superposent à la nappe en rapport avec un temps de transit et une atténuation physique d'un transport advectif.

Le facteur K désigne l'écoulement saturé dans la zone noyée, si l'objectif de l'évaluation n'est pas la nappe comme ressource mais une source karstique.

Le facteur P représente les précipitations dont le régime influence les trois facteurs précédents.

Le facteur S est un module supplémentaire pour intégrer l'atténuation spécifique dans les différentes couches du système. Ce facteur prend en compte le potentiel d'un contaminant particulier à être affecté par des processus de retard ou de dégradation, comme la sorption, la biodégradation, la filtration etc.

L'approche COST 620 comporte plusieurs méthodes pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque d'après les critères mentionnés ci-dessus (ZWAHLEN 2004). De plus, une méthodologie empirique est présentée pour le module spécifique (SINREICH *et al.* 2004b). Cette méthodologie est prévue pour être compatible avec n'importe laquelle des méthodes intrinsèques mentionnées. La méthodologie spécifique détermine, pour chaque contaminant individuel, un indice d'atténuation spécifique. Cet indice inclut tous les processus possibles

pour un contaminant particulier dans le sous-sol. Il est calculé par combinaison des propriétés du contaminant avec les propriétés des différentes couches. Il inclut le fait que des couches protectrices peuvent être court-circuitées en cas d'écoulement préférentiel (IQBAL & KROTHER 1995). La somme de tous les processus spécifiques qui ont une capacité d'atténuation correspond à une protection additionnelle contre un contaminant réactif, cela par rapport à un contaminant conservateur. Les classes de l'indice spécifique sont introduites dans la classification de la vulnérabilité intrinsèque, pour obtenir des classes de vulnérabilité spécifique (figure 5).

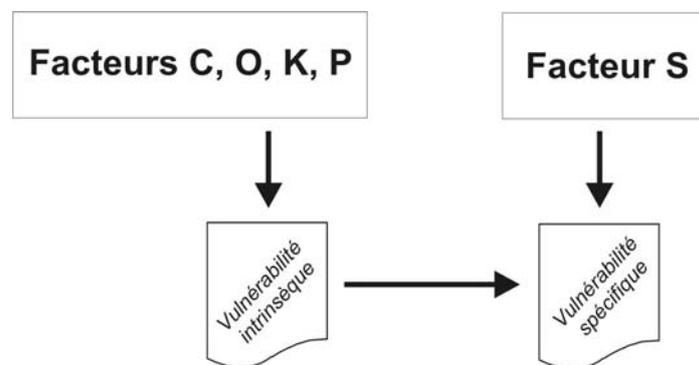


Figure 5 : Facteurs d'évaluation combinés pour obtenir des cartes de vulnérabilité intrinsèque ou spécifique.

Toutes les cartes du bassin de Vaulion présentées ci-après se réfèrent aux sources karstiques, car c'est leur protection contre une contamination agricole qui est ici prioritaire. En conséquence, en dehors de la migration verticale, le transport latéral dans le réseau karstique doit également être pris en considération. Cela vaut principalement pour la vulnérabilité intrinsèque, les effets spécifiques étant peu importants dans la zone saturée.

### Collecte des données

Dans la démarche méthodologique proposée, la fiabilité des cartes dépend de la qualité et de la représentativité des données qui sont recueillies. Les données, directes et indirectes, utilisées dans cette étude, proviennent de diverses sources comme la cartographie géologique, la géophysique, les traçages et analyses de sol.

En premier lieu, les épaisseurs des différentes couches meubles ont été déterminées, sur la base de la carte géologique, en faisant des sondages à la tarière à main (DIGOUT 2002) et en utilisant la géophysique pour les dépôts quaternaires (DIGOUT 2002, CLAVIEN 2003). L'épaisseur de la zone non-saturée varie entre 10 à 70 m et peut être approximativement estimée en prenant la différence d'altitude entre la surface topographique et la formation imperméable sur lequel le réseau karstique est développé (POCHON *et al.* 2004).

Finalement, la distance entre le point origine et les sources est mesurée pour le cheminement latéral dans la zone noyée.

Les paramètres nécessaires à l'application de la méthode sont déduits des propriétés générales des couches. Trois différents types de sol sont différenciés à l'aide d'analyses chimiques : un sol à rendzine au-dessus des calcaires, un sol brun sur le quaternaire et une petite zone de sol tourbeux sur les marnes. La pédologie locale correspond bien à celle du karst du Jura suisse (DALLA PIAZZA 1996). Les sédiments meubles sont composés de limon sableux (moraine) et gravier sableux (fluvio-glaciaire). La distribution des grains est assez inégale et l'analyse granulométrique conduit à attribuer une perméabilité moyenne pour la moraine et une perméabilité élevée pour le fluvio-glaciaire (figure 6).

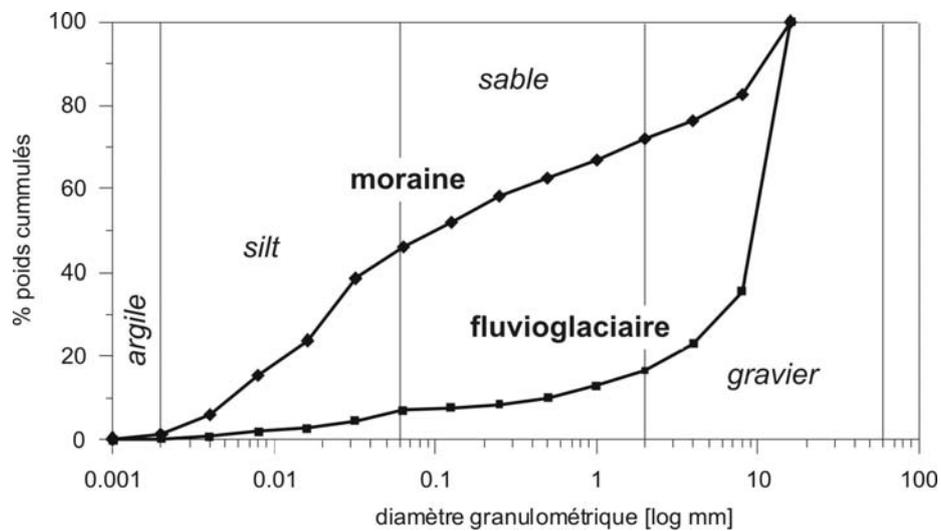


Figure 6 : Distribution granulométrique pour les deux types de dépôt quaternaire, la moraine et le fluvio-glaciaire.

Pour les cartes qui se réfèrent à la protection des sources, il est indispensable de connaître les différents sous-bassins qui alimentent les sources particulières. DIGOUT (2002) présente une première estimation de ces sous-bassins. Une détermination plus précise est en cours de réalisation au moyen d'une série de traçages (A. Pochon, communication orale). Les résultats préliminaires montrent toutefois que les sous-bassins se chevauchent partiellement et que leurs limites peuvent varier en fonction des conditions hydrologiques, phénomène bien connu en milieu karstique.

#### Carte de vulnérabilité intrinsèque

La carte de vulnérabilité intrinsèque (figure 7) est tirée de POCHON *et al.* (2004). Elle est basée sur une estimation quantitative des vitesses des eaux souterraines dans le système, entre le point d'infiltration (l'origine) et les sources. Ce paramètre, prenant en compte les

épaisseurs des couches, représente les facteurs O et K du concept COST 620, en tenant compte du facteur P en condition de hautes eaux. Le facteur C n'est pas pris en compte pour l'élaboration de cette carte, puisque les effets de ruissellement sont en général peu prononcés dans ce bassin.

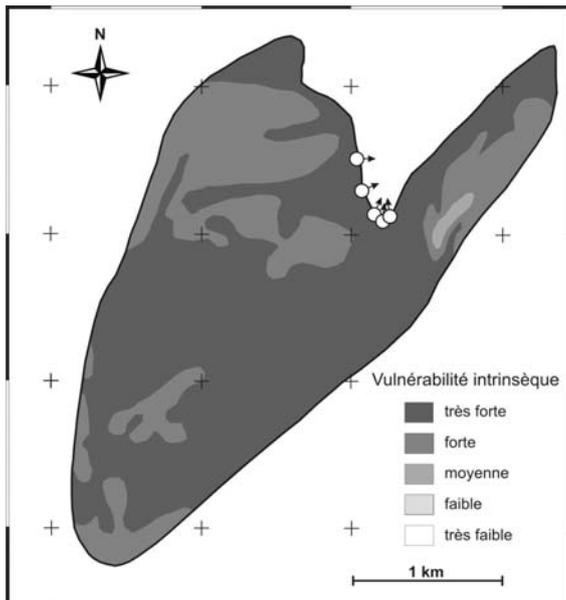


Figure 7 : Carte de vulnérabilité intrinsèque (POCHON et al. 2004).

L'ensemble du bassin est relativement vulnérable à un contaminant de comportement conservateur. Une certaine protection existe liée à la présence de dépôts meubles, si bien que les limites des classes suivent les contours des dépôts quaternaires. La carte délimite des zones très vulnérables pour le karst nu et une vulnérabilité moyenne à élevée pour les endroits où des sédiments quaternaires sont déposés. Les sédiments quaternaires jouent également un rôle important, car ils offrent une protection supplémentaire dans le cas d'un contaminant réactif. La couverture de sol, seule, n'est pas suffisante pour réduire la vulnérabilité spécifique d'une classe.

### Cartes de vulnérabilité spécifique

Des cartes de vulnérabilité spécifique ont été établies pour le nitrate et les coliformes, ceux-ci étant des contaminants importants pour bassin de Vaulion (figure 8). La méthodologie COST 620 est appliquée en utilisant un modèle conceptuel à quatre couches, y compris la zone noyée, ce qui correspond à un objectif de protection des sources. Les résultats de l'évaluation de l'atténuation spécifique sont liés à la carte intrinsèque de la figure 7.

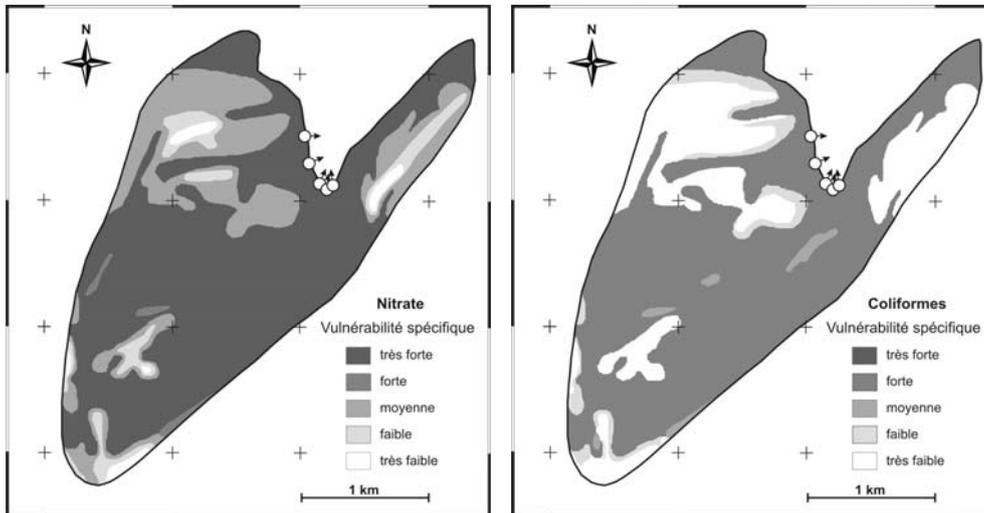


Figure 8 : Cartes de vulnérabilité spécifique pour le nitrate et les coliformes.

Le comportement spécifique du nitrate est déterminé par son potentiel de transformation physico-chimique sous conditions réductrices en absence relative d'oxygène. La présence d'un milieu partiellement réducteur est très vraisemblable dans les couches quaternaires et la tourbe. La réaction d'oxydo-réduction est la seule réaction qui est prise en compte comme processus d'atténuation du nitrate en utilisant la démarche méthodologique. Par contre, plusieurs processus peuvent affecter le comportement des coliformes. Une filtration de ces particules dans les pores fins du sol et des roches meubles est possible, accompagnée par une sorption au matériel argileux de ces couches. Ces effets peuvent également être efficaces, dans une moindre mesure, dans la matrice des calcaires (THORN & COXON 1992). Les bactéries, en tant que micro-organismes, sont aussi soumises à une décroissance naturelle qui augmente avec leur temps de séjour dans le système.

D'autres contaminants spécifiques ont été testés et soumis à une évaluation de la vulnérabilité dans ce bassin (SINREICH *et al.* 2003). Une comparaison de la répartition des classes montre que la vulnérabilité change considérablement d'une substance à l'autre (figure 9). Cela est dû aux différents processus d'atténuation potentiels (sorption, biodégradation, volatilisation etc.) qui sont pris en compte pour l'évaluation. Les zones les moins vulnérables du bassin de Vaulion se trouvent généralement là où les roches meubles sont présentes (30% de la surface du bassin), car c'est dans ces couches que les processus efficaces d'atténuation pour les différents types de contaminants prennent place. L'atténuation des hydrocarbures (benzène, naphthalène) est considérée comme significative pour l'ensemble du bassin en raison de leur caractère volatil, menant à une dégradation dans le karst (interface eau-air importante liée à l'écoulement turbulent dans les conduits).

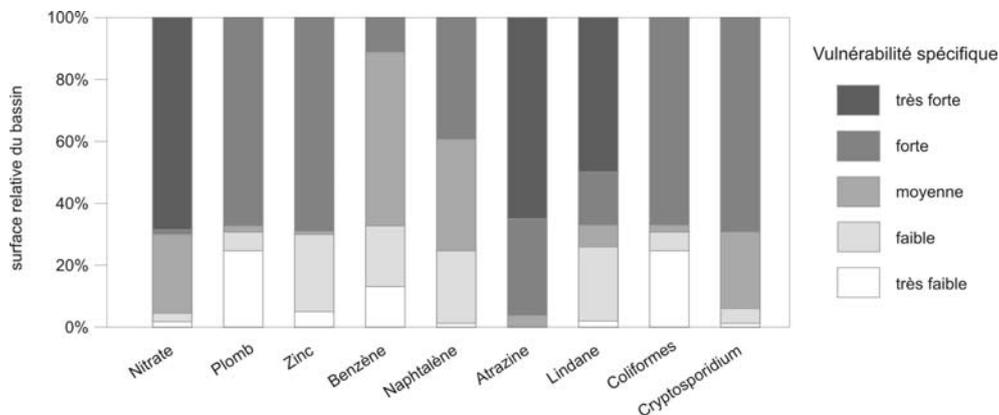


Figure 9 : Comparaison de la vulnérabilité spécifique vis-à-vis de différents contaminants (nitrate, métaux lourds, hydrocarbures, pesticides et micro-organismes) pour le site de Vaulion. Les taux réfèrent à la répartition spatiale des cinq classes de vulnérabilité.

## Evaluation du risque

### Intensité de risque

L'action COST 620 a défini deux types différents de risque, l'intensité de risque et le risque total (figure 1). La première étape est la construction des cartes d'intensité de risque global et spécifique. La combinaison de banques de données concernant la susceptibilité inhérente au système et les informations sur l'utilisation du sol, a souvent été appliquée comme outil de gestion du territoire (MUÑOZ & LANGEVIN 1991, BOCANEGRA *et al.* 2001). Toutefois, l'approche européenne n'apporte aucune démarche concrète pour le mode de combinaison des cartes de dangers et de vulnérabilité. Dans le cadre de la présente étude, une combinaison linéaire en matrice a été choisie (CLAVIEN 2003, figure 12), comme proposée par DELPORTE *et al.* (2000). Cela génère des classes de risque qui sont peu influencées par les valeurs extrêmes, contrairement à ce que l'on obtient en appliquant une approche multiplicative.

Les cartes de l'intensité de risque, établies en combinant la carte de danger global avec la carte de vulnérabilité intrinsèque (figure 10) et les cartes de danger spécifique avec les cartes de vulnérabilité spécifique (figure 11), montrent des similitudes, mais généralement avec un risque plus faible pour les coliformes. La répartition des classes se fait en fonction d'une superposition de la distribution des dépôts quaternaires et des contours des parcelles. Les valeurs de risque, parfois assez élevées, sont confirmées par des contaminations potentielles ou existantes sur des surfaces vulnérables.

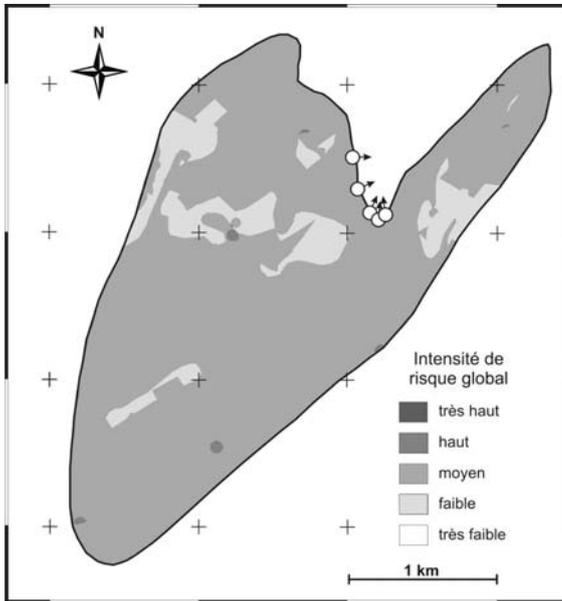


Figure 10 : Carte de l'intensité de risque global.

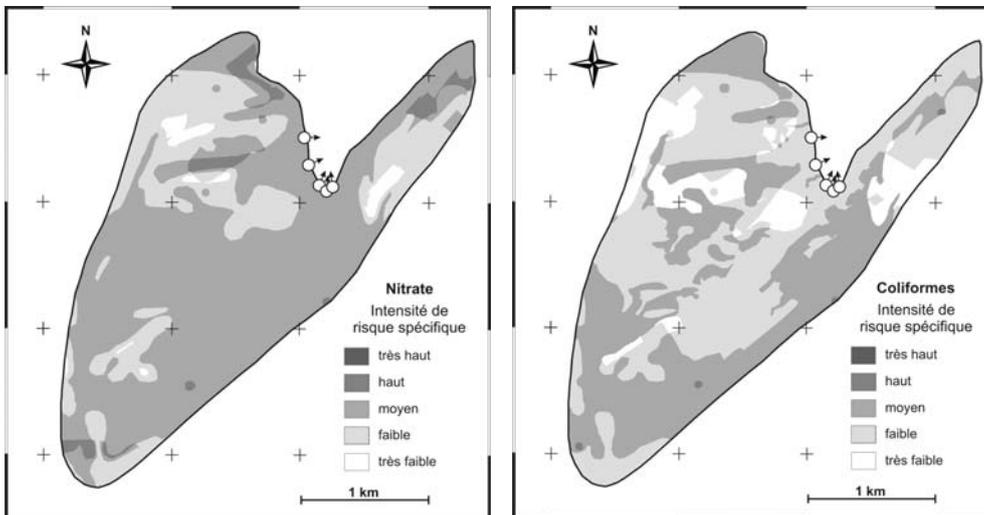


Figure 11 : Cartes d'intensité de risque spécifique pour le nitrate et les coliformes.

### Sensibilité au risque

COST 620 a mis en évidence qu'il est important de considérer la sensibilité à une contamination pour aboutir à un concept de risque total. Les aspects 'valeur d'une ressource' et 'conséquences d'une contamination' sont inclus dans l'évaluation du risque, même si aucune démarche concrète n'est fixée pour atteindre cet objectif. L'eau souterraine contient une valeur d'extraction et une valeur in-situ de la ressource (NRC 1997). Une systématique innovante est donc proposée, qui illustre ici les conditions rencontrées sur le site de Vaulion, mais qui est aussi valable et applicable dans d'autres cas similaires. Les conséquences socio-économiques de la contamination d'une ressource ou d'une source karstique dépendent de deux facteurs principaux : la dangerosité d'une substance spécifique et la valeur de la ressource et de l'eau de l'exutoire. On pourrait également envisager d'autres facteurs, comme p.ex. l'effort et les frais nécessaires à l'assainissement éventuel de la ressource (JOHANSSON *et al.* 1999), toutefois ceux-ci ne sont pas estimés essentiels dans le cas des sources karstiques.

La dangerosité peut être décrite par la toxicité d'une substance chimique pour un organisme et par le potentiel d'un germe à causer une maladie à l'homme. Certains contaminants ne mettent pas en danger la santé humaine et d'autres ont un sérieux impact en cas de consommation à long terme voire même à court terme.

Cette dangerosité s'exprime généralement par un seuil de tolérance pour l'eau potable. Les micro-organismes pathogènes doivent être considérés comme très dangereux car ils peuvent déjà être virulents en concentration minimale. Une classification qualitative pour l'évaluation de ce facteur est présentée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Classification d'un type de contaminant par rapport à sa dangerosité (toxicité pour les substances chimiques et pathogénie pour les micro-organismes).

très forte		toxique ou pathogène en faible concentration	p.ex. bactéries pathogènes
forte		toxique ou pathogène en haute concentration, ou en faible concentration avec consommation à long terme	p.ex. benzène
moyenne		toxique en haute concentration avec consommation à long terme	p.ex. nitrate
faible		organoleptiquement déplaisant	p.ex. chlorure
très faible		inoffensif aux hommes et à l'environnement	

La valeur socio-économique de l'eau souterraine est premièrement déterminée par l'importance de la ressource. HÖTZL (1996) parle dans ce contexte d'aquifères principaux et secondaires. CORNIELLO & DUCCI (2001) définissent la valeur socio-économique par la recharge et l'utilisation d'une ressource. Les eaux captées ont, en principe, plus de valeur

que des eaux non-exploitées. Par exemple, une contamination par des agents pathogènes est négligeable si l'eau souterraine n'est pas exploitée pour l'alimentation. Pour la présente application, le facteur 'valeur' est couplé à l'utilisation des sources et à leurs débits (tableau 2).

Les deux types de contaminant considérés, le nitrate et les coliformes, ont un potentiel de dangerosité différent. Le nitrate pose un problème si le seuil de tolérance est dépassé à long terme, tandis qu'un seul pathogène suffit théoriquement pour infecter un organisme. Donc, conformément au tableau 1, le nitrate tombe dans une classe de toxicité modérée, et les coliformes, comme indicateur pour les bactéries pathogènes, sont classés comme très dangereux. Etant donné que la valeur de la ressource a son importance et que l'eau potable est exploitée pour alimenter le village de Vaulion, il faut considérer que la commune ne dispose actuellement pas d'autre source d'eau potable ou qu'une telle alternative nécessiterait un investissement important. Des classes de valeur faible à élevée sont assignées aux sources (tableau 2).

Tableau 2 : Valeur des eaux souterraines karstiques avec classification pour les sources de Vaulion.

très haute		alimentation en eau potable à gros débit ou ressource écologiquement très précieuse	
haute		alimentation en eau potable à moyen débit (ou gros débit avec installation de traitement) ou ressource écologiquement précieuse	Cul du Nozon et Américain
moyenne		alimentation en eau potable à faible débit (ou moyen débit avec installation de traitement ou avec alimentation alternative)	Trou à Bonnard
faible		source non-captée ou ressource insignifiante, mais avec valeur environnementale	Gros Fort, Cascade
très faible		ressource insignifiante (non-exploitable, eau souterraine profonde, déjà polluée, sans valeur environnementale)	

Une carte de la sensibilité des sources à une contamination potentielle peut être construite avec les données évaluées ci-dessus. La dangerosité du contaminant et la valeur de la source sont combinées sous forme d'une matrice et une classe de sensibilité peut être attribuée (figure 12). Le paramètre 'sensibilité' représente le dégât économique et social potentiel en cas de contamination. La classification est valable pour un sous-bassin entier et doit être refaite pour chaque type de contaminant pris en compte. La sensibilité est haute pour une ressource importante et pour une menace par un contaminant dangereux. Au contraire, une ressource non-exploitable ou un contaminant inoffensif favorisent une sensibilité basse. Les bassins versants des sources Gros Fort et Cascade sont faiblement sensibles à un impact en nitrate et moyennement sensibles aux coliformes. Pour les bassins des sources Trou à Bonnard, Cul du Nozon et Américain, la démarche montre une sensibilité au nitrate moyenne et une sensibilité aux coliformes élevée. Il y a donc une

classe par source qui vaut unitairement pour toute la surface de son sous-bassin. Il est par conséquent indispensable de bien connaître les limites des sous-bassins des différentes sources.

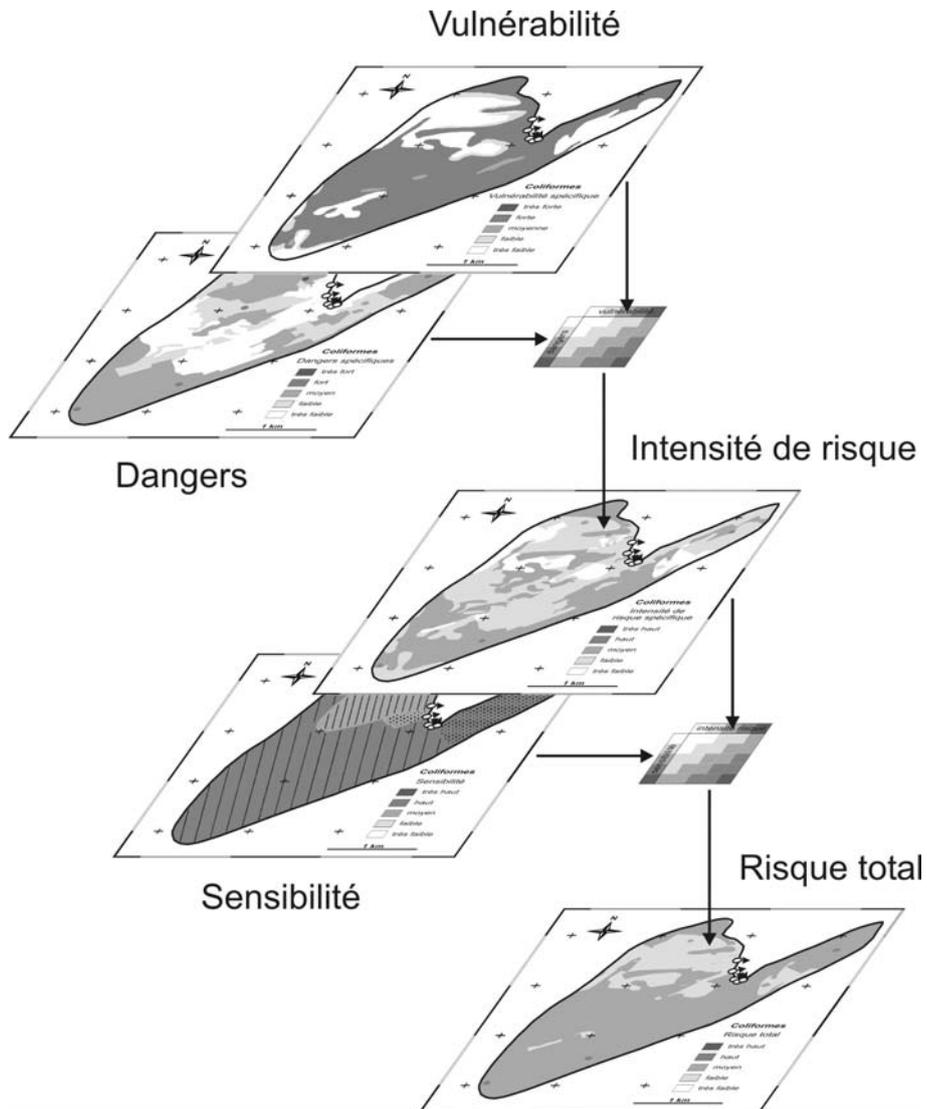


Figure 12 : Démarche pour obtenir des cartes de risque par superposition des cartes de base sous forme d'un SIG.

## Cartes de risque total

L'évaluation de la sensibilité au risque est la dernière étape pour déterminer un risque total. La figure 12 montre comment les cartes de risque sont établies sur la base des cartes précédentes. Cela est fait par une combinaison de matrice pour toutes les étapes. La superposition de toutes ces cartes (dangers, vulnérabilité et sensibilité) avec leurs classes individuelles fournit des cartes de risque total pour le nitrate et les coliformes (figure 13). Il est admis, selon HÖTZL & NEUKUM (2003), que l'aspect 'physique' (intensité du risque) et l'aspect 'social' (sensibilité au risque) sont pondérés de manière équivalente.

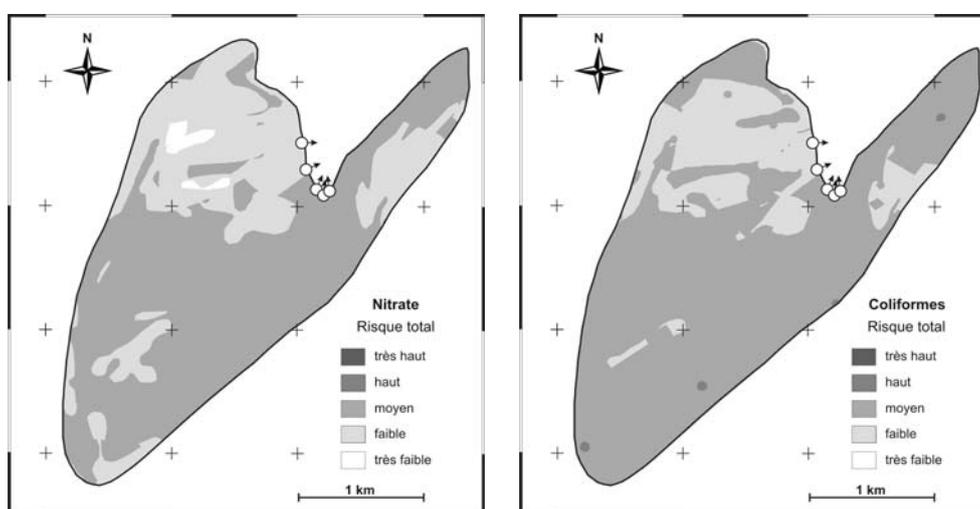


Figure 13 : Cartes de risque total pour le nitrate et les coliformes.

Une comparaison des cartes des figures 11 et 13 met en évidence que l'intensité du risque pour le nitrate est majoritairement plus haute que pour les coliformes, mais que la situation s'inverse pour le risque total. Ce résultat est dû à la forte dangerosité des micro-organismes par rapport aux autres contaminants. C'est effectivement la concentration en pathogènes qui pose le problème le plus crucial pour l'alimentation locale en eau potable.

## Plausibilité et validation des résultats

Pour vérifier la signification et la fiabilité des cartes obtenues, des moyens de validation sont appliqués au site de Vaulion. Comme les cartes se réfèrent à une protection des sources, les données mesurées à ces exutoires du système hydrogéologique sont appropriées pour caractériser la vulnérabilité et le risque dans le bassin. Deux approches différentes sont suivies, d'une part la plausibilité des paramètres caractéristiques des

sources karstiques par rapport à la répartition spatiale des zones, et d'autre part la validation ponctuelle sur une surface d'une vulnérabilité définie. Tous ces moyens ne sont, bien entendu, qu'une approximation qui est influencée par les faiblesses des méthodes appliquées et les incertitudes des données de terrain, p.ex. les limites des sous-bassins versants.

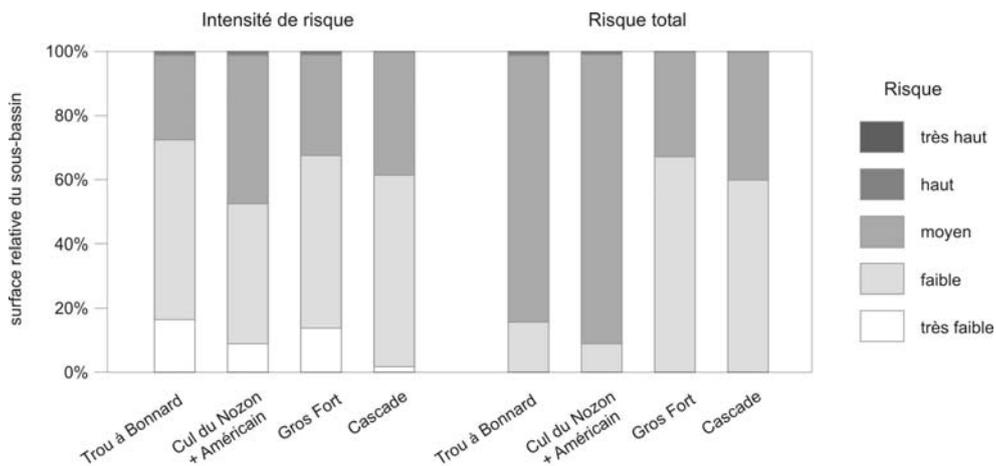


Figure 14 : Cartes du risque spécifique des coliformes : surface relative des zones de risque pour les bassins versants des différentes sources.

La fluctuation de la concentration d'un contaminant à une source dépend de sa présence effective sur le bassin versant. Particulièrement en cas de crue, les sources karstiques réagissent à un impact en surface, en transportant les contaminants dans les eaux fraîchement infiltrées. Une statistique des zones de risque montre une différence entre les sous-bassins des sources (figure 14). La distribution des zones, pour tous les sous-bassins, devrait correspondre à ce qu'on peut observer aux sources respectives. Effectivement, on peut détecter un nombre considérable de coliformes (*Escherichia coli*) en échantillonnant les eaux des sources en crue (A. Pochon, communication orale). On voit, dans la figure 14, que pour toutes les sources l'intensité de risque est notamment faible à moyen. Conformément à cela, les pathogènes sont insignifiants en étiage. Toutefois, les petites surfaces en risque élevé apparaissent généralement suffisantes pour dégrader périodiquement la qualité des eaux par une contamination bactérienne. Cette information est importante pour une réorganisation de l'utilisation du sol, comme elle montre l'effet des dangers ponctuels à un risque de pollution. Le risque total est en majeure partie moyen pour les sources captées et faible pour les deux autres sources. Cela paraît plausible, si on tient compte du fait que la qualité des eaux captées pose parfois un problème à la commune. Une atteinte bactériologique, quant à elle, n'entraîne guère de conséquences pour les sources non-captées.

Pour vérifier la plausibilité des cartes de risque de nitrate, la répartition des zones peut être comparée avec la réponse en nitrate des sources. Suite aux précipitations d'automne 2003, les concentrations en nitrate au Gros Fort ont augmenté jusqu'à 20 mg/l en crue, par rapport à un bruit de fond en étiage de 15 mg/l (figure 15). C'est le résultat de l'application réelle de nitrate sur tout le sous-bassin du Gros Fort. Ce chimiogramme est en accord avec le fait que plus que 50% de la surface de ce sous-bassin apparaît sur la carte avec une intensité de risque moyenne ou élevée (figure 11). De plus, le maintien des concentrations en dessous des valeurs seuil pour la qualité des eaux justifie une carte de risque global avec une grande majorité en zone de risque faible (figure 13).

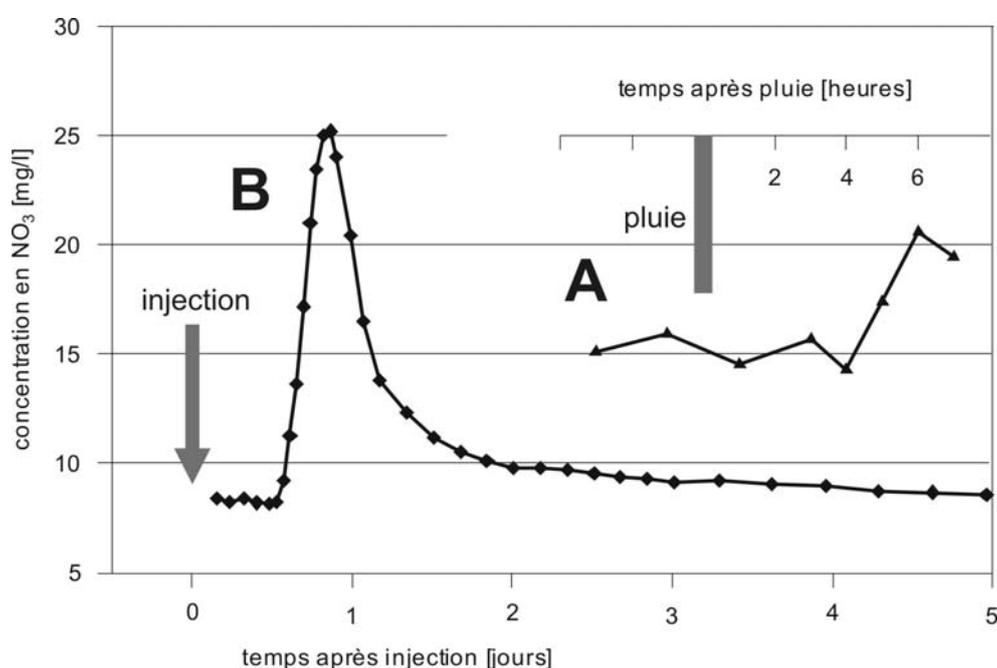


Figure 15 : A : Chimiogramme du nitrate pour la source du Gros Fort avec variabilité 'naturelle'. B : Courbe de restitution à la source de la Cascade comme résultat d'un traçage en nitrate sur une zone très vulnérable.

Tandis que l'approche des surfaces est appropriée pour des impacts diffus, des traçages artificiels permettent de valider un seul point sur la carte de vulnérabilité ou sur la carte de risque. Un essai de traçage a été effectué pour valider la délimitation d'une zone très vulnérable, située 300 m en amont de la source de la Cascade (figure 2). Cette zone est caractérisée par des roches carbonatées karstifiées affleurantes avec une couverture de sol de faible épaisseur. Le traçage a été réalisé en étiage, en arrosant une surface de 20 m<sup>2</sup> avec un débit de 20 l/min pendant 5 heures. L'arrosage a été effectué en trois phases : une première avec de l'eau claire pour saturer le sol, une deuxième avec l'injection du traceur,

suivie par une phase de rinçage. La quantité totale d'eau injectée était de 6 m<sup>3</sup>. Un des traceurs était le nitrate sous forme du sel NaNO<sub>3</sub> (3,5 kg). A la Cascade, une première augmentation de la concentration en nitrate a été constatée 15 heures après l'injection (figure 15). La courbe de restitution est pointue avec une queue de pic faible. Le sommet du pic s'observe déjà après 21 heures, avec une concentration maximale de 25 mg/l (bruit de fond 8 mg/l). Cette concentration est tout de même atténuée 500 fois par rapport à la concentration injectée et elle reste inférieure à l'exigence de l'Ordonnance fédérale sur la protection des eaux (OEaux) pour les eaux souterraines utilisées comme eau potable.

Le traçage prouve que le transport est rapide dans le karst entre le point d'injection et la source prélevée. Une telle vitesse de circulation, accompagnée par une atténuation relativement faible, dénote des processus de rétention assez faibles, ce qui légitime une évaluation en zone très vulnérable sur la carte spécifique au nitrate. D'autres possibilités pour une validation ponctuelle peuvent être réalisées en cas de pertes accidentelles de contaminant. Deux incidents anciens liés aux infiltrations ponctuelles de purin sont rapportés à l'est du bassin de Vaulion (CSD 1992, figure 2). Ces impacts étaient localisés sur des zones déterminées vulnérables aux pathogènes et ont effectivement conduit à une atteinte bactériologique des sources correspondantes.

## Discussion

Il y a trois différents types de cartes éditées dans le cadre de la démarche pour l'évaluation de la vulnérabilité et du risque. La carte de vulnérabilité est le résultat des propriétés géologiques et hydrogéologiques du système karstique. Au point de vue de la vulnérabilité spécifique, ces informations sont combinées avec les propriétés physico-chimique d'un contaminant particulier. Une telle carte permet de montrer de quelle façon une contamination ponctuelle est atténuée entre son origine et l'objectif. Elle détermine aussi les endroits critiques d'un bassin vis-à-vis d'une contamination. Les cartes de vulnérabilité du site de Vaulion montrent une variabilité spatiale due principalement à la répartition des couches protectrices.

Par contre, une carte de vulnérabilité ne suffit pas pour gérer l'occupation du sol sur le bassin qui nécessite des informations supplémentaires sur les dangers. Une carte de l'intensité du risque peut fortement diverger de la carte de vulnérabilité correspondante. Une telle carte peut aider à estimer la façon dont les dangers pourraient être distribués sur le bassin pour minimiser leur impact sur les sources. Par exemple, il peut être toléré de placer un danger faible sur une zone de vulnérabilité élevée. Parallèlement, une zone moins vulnérable peut comporter un risque considérable, si elle est occupée par un danger fort.

Les cartes de risque total incluent, à part l'aspect physique des deux premières cartes, une évaluation sociale de la ressource et de l'eau souterraine captée. Cela permet d'optimiser la gestion complète du bassin, en ce qui concerne l'occupation du sol et l'exploitation de l'eau souterraine. Un risque total élevé indique qu'il y a une mauvaise gestion du bassin. La plus grande part du site d'étude comporte un risque total en classe moyenne. En effet, la commune de Vaulion a actuellement un problème avec la qualité des eaux captées. Dans un

tel cas, des changements de l'utilisation du sol (respectivement une adaptation des zones de protection) en tenant compte de la vulnérabilité, devraient être envisagés. Le risque total permet également une comparaison, non seulement entre les différentes sources d'un même système, mais aussi entre des systèmes différents.

Il y a donc différents types de cartes se rapportant à différentes problématiques. Il est essentiel d'avoir conscience de toutes les données du problème afin de choisir au mieux la carte appropriée. Il faut aussi considérer que l'élaboration des cartes est basée sur une démarche qualitative et ne peut se départir d'une certaine subjectivité. De plus, l'évaluation des données est soumise à une incertitude. Une faiblesse, qui est devenue évidente dans le cadre de cette application, est la tendance d'approcher les valeurs vers une classe modérée. Par exemple, la plupart des zones de forêt, qui ne comportent aucun danger, tombent dans un risque moyen, en raison d'une vulnérabilité très forte. Par contre, cette tendance peut généralement garantir que l'utilisateur ne surestime pas l'importance d'un seul paramètre. Il est de la tâche des hydrogéologues de préciser la signification et les limites des cartes, afin de rendre leur utilisation possible par d'autres acteurs impliqués dans la gestion du territoire. Finalement, il est indispensable de définir clairement les termes de 'vulnérabilité', 'risque' et 'sensibilité', qui sont utilisés dans un sens différent pour d'autres études.

Le concept européen est cohérent et logique. Toutefois, il est possible de l'appliquer avec différentes méthodes individuelles et différents modes de combinaison. La présente étude propose un mode d'évaluation adéquat, qui prenne en compte l'importance des différents modules. Les cartes qui sont générées en utilisant cette approche multi-disciplinaire sont un outil puissant pour la gestion d'un bassin. Des études de validation sont bien appropriées pour augmenter la fiabilité des cartes et, en même temps, pour rappeler les incertitudes inhérentes à ce type de cartographie. L'approche présentée est aussi compatible avec les méthodes de cartographie de vulnérabilité déjà utilisées en Suisse et représente un outil complémentaire pour la pratique de la protection des eaux. Le défi pour l'avenir sera de perfectionner le concept de risque comme outil de gestion d'un environnement karstique et de ses eaux souterraines, en développant une démarche dynamique avec des liens plus flexibles entre les différents modules. Cela permettrait notamment d'intégrer les changements liés aux activités humaines sur le bassin, pour mettre à jour les cartes au fur et à mesure.

## **Remerciement**

Cette étude a été financée par l'Office fédéral de l'éducation et de la science (OFES), l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) et le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (CHYN). Les concepts qui y sont adaptés ont été développés dans le cadre de l'action européenne COST 620 sur la 'Cartographie de la vulnérabilité et du risque pour la protection des aquifères en milieu karstique'. Nous sommes reconnaissants à Alain Pochon pour ses nombreuses informations sur le bassin de Vaulion et pour la relecture critique du manuscrit.

## Références

- AUBERT D. & DREYFUSS M. 1963. Atlas géologique de la Suisse. Feuille n° 42 Orbe, Commission géologique Suisse, Berne.
- BOCANEGRA E.M., VILLAMIL M. & MASSONE H.E. 2001. Aquifer vulnerability and bacteriological contamination hazard on Mar del Plata (Argentina) suburban area. Seiler & Wohnlich (eds). *New Approaches Characterizing Groundwater Flow* : 457-460.
- CELICO F., MUSILLI I. & NACLERIO G. 2004. The impacts of pasture- and manure-spreading on microbial groundwater quality in carbonate aquifers. *Environmental Geology*, 46, 2 : 233-236.
- CLAVIEN D. 2003. Cartographie de la vulnérabilité spécifique, des dangers et des risques à l'aide d'un SIG : application au bassin d'alimentation des sources karstiques de Nozon (Vaulion, VD, Suisse). Travail de diplôme postgrade, Centre d'Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel, 74 p.
- CORNIELLO A. & DUCCI D. 2001. The risk contamination map of the aquifer underlying the Middle Volturno River plain. Proc. 3rd International Conference on Future Groundwater at Risk, Lisbon, 25-33.
- COXON C.E. 1999. The nature of human impacts on karst waters : agriculturally induced impacts. Drew & Hötzl (eds). *Karst hydrogeology and human activities. International Contributions to Hydrogeology*, 20 : 37-63.
- CSD 1992. Rapport d'étude hydrogéologique pour la délimitation des zones de protection, Commune de Vaulion. Rapport non publié, 19 p.
- DALLA PIAZZA R. 1996. Géochimie des altérations dans trois écosystèmes sol tempérés – application à l'acquisition des caractéristiques chimiques des solutés. Thèse de doctorat, Université de Lausanne (EPFL), 237 p.
- DALY D., DASSARGUES A., DREW D., DUNNE S., GOLDSCHIEDER N., NEALE S., POPESCU I.C. & ZWAHLEN F. 2002. Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10 : 340-345.
- DALY D., HÖTZL H. & DE KETELAERE D. 2004. Risk assessment – risk definition. Zwahlen (ed). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers* : 106-107.
- DE KETELAERE D. & DALY D. 2004. Hazard mapping – vulnerability in a risk framework. Zwahlen (ed). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers* : 84-86.
- DELPORTE C., ZWAHLEN F., DE KETELAERE D. & PERRIN J. 2000. Utilisation des cartes de risques aux contaminations des eaux karstiques et des cartes de vulnérabilité intégrées comme outils de gestion du territoire. Conférence ESRA 2000, Eaux Souterraines en Région Agricole, 4 p.
- DIGOUT M. 2002. Cartographie de la vulnérabilité du bassin d'alimentation des sources karstiques du Nozon (Vaulion, VD) à l'aide du modèle de transport 1D VULK. Travail de diplôme postgrade, Centre d'Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel, 56 p.
- DOERFLIGER N., JEANNIN P.-Y. & ZWAHLEN F. 1999. Water vulnerability assessment in karst environments : a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology*, 39, 2 : 165-176.

- DOERFLIGER N. & ZWAHLEN F. 1998. Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). Guide pratique, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, 56 p.
- HÖTZL H. 1996. Grundwasserschutz in Karstgebieten. *Grundwasser*, 1/1 : 5-11.
- HÖTZL H. 2004. Risk assessment – assessment concept. Zwahlen (ed). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers* : 108-113.
- HÖTZL H. & NEUKUM C. 2003. Risk assessment to groundwater contamination. – Proc. 1st International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk, Salamanca/Mexico, 1 : 20-32.
- IQBAL M.Z. & KROTHER N.C. 1995. Infiltration mechanism related to agricultural waste transport through the soil mantle to karst aquifers of southern Indiana, USA. *Journal of Hydrology*, 164 : 171-192.
- JOHANSSON P.-O., SCHARP C., ALVETEG T. & CHOZA A. 1999. Framework for ground water protection – the Managua ground water system as an example. *Ground Water*, 37, 2 : 204-213.
- MUÑOZ S. & LANGEVIN C. 1991. Adaptation d'une méthode cartographique assistée à l'élaboration de cartes de vulnérabilité au Guatemala. *Hydrogéologie*, 1 : 65-84.
- NRC 1997. *Valuing ground water – economic concepts and approaches*. National Research Council, National academy press, Washington D.C., 182 p.
- PERRIN J. 2002. Les sources du Nozon (Vaulion/Vd). *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, 88, 1 : 59-75.
- PERRIN J., TOMASI N., ARAGNO M. & ROSSI P. 2001 Evolution of inorganic (nitrate) and faecal bacterial contaminants in the water of a karstic aquifer, Milandre test site (Swiss Jura). 7<sup>e</sup> Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire et Milieu Fissuré, *Sci. Tech. Envir., Mém. H. S.*, 13 : 273-276.
- POCHON A., SINREICH M., DIGOUT M. & ZWAHLEN F. 2004. Vaulion test site, Jura Mountains, Switzerland – Intrinsic and specific vulnerability mapping. Zwahlen (ed). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers* : 217-230.
- SINREICH M., KOZEL R. & MUDRY J. 2004 a. Conceptual model for specific vulnerability assessment. Zwahlen (ed). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers* : 64-67.
- SINREICH M., KOZEL R. & MUDRY J. 2004 b. Specific vulnerability method. Zwahlen (ed). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers* : 67-82.
- SINREICH M., POUCHON A. & ZWAHLEN F. 2003. Influence of contaminant fate and transport processes on vulnerability mapping : A Swiss karst test site. Proc. 1st International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk, Salamanca/Mexico, 1 : 296-310.
- THORN R.H. & COXON C.E. 1992. Hydrogeological aspects of bacterial contamination of some western Ireland karst limestone aquifers. *Envir. Geol. Water Sci.*, 20, 1 : 65-75.
- TRIPET J.-P., DOERFLIGER N., ZWAHLEN F. & DELPORTE C. 2000. Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland. *Acta Carsologica*, 29/1 : 163-171.
- ZWAHLEN F. (ed.) 2004. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers – COST Action 620*. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels, Luxemburg : 297 p.  
<http://capella.unine.ch/chyn/pdf/FinalReportCOST620.pdf>