

Méthode de cartographie de la vulnérabilité

Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en région karstique



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Méthode de cartographie de la vulnérabilité

Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en région karstique

Impressum

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteur

Pierre-Yves Jeannin

ISSKA, Institut suisse de spéléologie et de karstologie,
La Chaux-de-Fonds

Groupe de travail

Adrian Auckenthaler, AFUE (Bâle-Campagne)

Dieter Böhi, Kellerhals+Haefeli (Berne)

Simona Bronzini, SPAAS (Bellinzzone)

Vivian Gremaud, SEN (Sion)

Rainer Hug, AFU (Soleure)

Sybille Kilchmann, Marc Schürch, OFEV (Berne)

Pierre Christe, anciennement SEN (Sion)

Alain Pochon, AquaGeo (Auvernier)

Michael Sinreich, anciennement OFEV (Berne)

François Zwahlen, anciennement CHYN (Neuchâtel)

Mise en page

Ruben Burn, OFEV

Photo de couverture

Pâturages avec dolines et petites pertes, Combe des
Begnines, Jura vaudois.

© Rémy Wenger, ISSKA

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uw-2510-f

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand.

La langue originale est le français.

© OFEV 2025

Table des matières

<u>Méthode de cartographie de la vulnérabilité</u>	1
<u>Abstracts</u>	5
<u>Avant-propos</u>	6
<u>1 Introduction</u>	7
1.1 Contexte	7
1.2 Cadre légal	9
1.3 Vulnérabilité des eaux d'un captage aux pollutions	9
<u>2 Généralités sur le karst</u>	11
2.1 Systèmes d'écoulements souterrains en milieu karstique et leur vulnérabilité	11
<u>3 Choix de la méthode d'évaluation</u>	14
3.1 Introduction	14
3.2 Aquifères karstiques ou fissurés	14
3.3 Aquifère karstiques faiblement ou fortement hétérogènes	15
<u>4 Évaluation de la vulnérabilité en milieu karstique fortement hétérogène et transformation en zones de protection des eaux, EPIK 2.0</u>	16
4.1 Contexte, différence entre EPIK 1.0 et EPIK 2.0	16
4.2 Principe	17
4.3 Paramètre I (conditions d'infiltration)	19
4.4 Paramètre P (couverture protectrice)	25
4.5 Paramètre E (épikarst)	28
4.6 Paramètre K (conduits karstiques)	31
4.7 Combinaison des paramètres et cartes de vulnérabilité	34
4.8 Transformation en zones de protection S et secteurs de protection	36
<u>5 Conclusion</u>	37
<u>6 Bibliographie</u>	38
<u>7 Annexes</u>	40

Abstracts

The EPIK 2.0 method is a multi-criteria approach that helps hydrogeologists assess the amount of time it takes for water to pass between a point in a catchment area and a groundwater catchment. The nature of the epikarst (*E*), the protective cover (soil or moraine) overlying the karst formation (*P*); the conditions of infiltration, diffuse or concentrated (*I*); and the characteristics of the karstic network (*K*) are assessed and combined to produce a vulnerability map from which a map of protection zones (S1, S2, Sh, Sm and Au / Ao) within the meaning of the Waters Protection Ordinance can be created.

Keywords:

Karst regions, vulnerability, multi-criteria approach

La méthode EPIK 2.0 est une approche multicritère qui aide l'hydrogéologue à évaluer le temps de séjour de l'eau entre un point d'un bassin d'alimentation et un captage des eaux souterraines. La nature de l'épikarst (*E*), la couverture protectrice (sol ou moraine) surmontant la formation karstique (*P*), les conditions d'infiltration, diffuse ou concentrée (*I*), et les caractéristiques du réseau karstique (*K*) sont évalués et combinés pour produire une carte de vulnérabilité qui pourra être transposée en carte de zones de protection (S1, S2, Sh, Sm et Au / Ao) au sens de l'ordonnance fédérale sur la protection des eaux (OEaux).

Mots-clés:

régions karstiques, vulnérabilité, méthode multicritère

EPIK 2.0 ist eine Multikriterien-Methode, die der hydrogeologischen Fachperson hilft, die Fließdauer des Wassers zwischen einem Punkt eines Einzugsgebiets und einer Grundwasserfassung zu ermitteln. Die Art des Epikarsts (*E*), die schützende Deckschicht (*P*) über der Karstformation (Protektion; Boden oder Moräne), die Infiltrationsverhältnisse (*I*; diffus oder konzentriert) und die Eigenschaften des Karstnetzes (*K*) werden bewertet und kombiniert, um eine Vulnerabilitätskarte zu erstellen, die sich in eine Gewässerschutzkarte (Zonen S1, S2, Sh und Sm sowie Bereiche Au und Ao) im Sinne der Gewässerschutzverordnung überführen lässt (GSchV).

Stichwörter:

Karstgebiete, Vulnerabilität, Multikriterien-Methode

Il metodo EPIK 2.0 è un approccio a più criteri che sostiene gli idrogeologi nella valutazione del tempo di permanenza dell'acqua tra un punto di un bacino imbrifero e una captazione di acque sotterranee. La natura dell'epicarso (*E*), la copertura di protezione (suolo o morena) che ricopre la formazione carsica (*P*), le condizioni d'infiltrazione diffusa o concentrata (*I*) e le caratteristiche della rete carsica (*K*) sono valutate e combinate al fine di ottenere una carta di vulnerabilità che può essere convertita in una carta delle zone di protezione (S1, S2, Sh, Sm e Au / Ao) ai sensi dell'ordinanza sulla protezione delle acque.

Parole chiave:

regioni carsiche, vulnerabilità, un approccio a più criteri

Avant-propos

Les aquifères situés dans les régions karstiques jouent un rôle majeur dans l'approvisionnement en eau de certaines régions de Suisse, telles que le Jura, le nord des Alpes et certaines parties du sud-est du pays. Dans ces régions, la délimitation des zones de protection des eaux souterraines est donc cruciale et requiert une méthode spécifique : la cartographie de la vulnérabilité (sensibilité à la pollution des eaux souterraines). En effet, dans les régions karstiques, les vitesses d'écoulement sont très hétérogènes, si bien que même une pollution très éloignée du point de captage peut présenter un danger pour l'eau captée.

La présente publication décrit la méthode EPIK 2.0, qui a été remaniée et vise à cartographier la vulnérabilité dans les aquifères karstiques fortement hétérogènes. Elle complète le guide publié en 2022 intitulé « Protection des eaux souterraines : aquifères karstiques et fissurés fortement hétérogènes ». La publication s'adresse aux autorités spécialisées, aux géologues et ingénieurs conseils et aux spécialistes de la recherche qui mènent des activités et exploitent des installations dans des régions karstiques. La nouvelle méthode EPIK 2.0 a été élaborée sous l'égide de l'Office fédéral de l'environnement, en étroite collaboration avec l'Institut suisse de spéléologie et de karstologie et un groupe de travail composé de membres des autorités, des milieux scientifiques et des bureaux de géologues et d'ingénieurs.

La méthode EPIK 2.0 répond au besoin d'une approche uniforme et pragmatique pour délimiter les zones de protection des eaux souterraines dans les régions karstiques. Elle se fonde sur l'évaluation de plusieurs critères hydrogéologiques qui caractérisent la protection des eaux souterraines dans les différentes parties du bassin d'alimentation d'un captage d'eaux souterraines. La vulnérabilité est calculée à l'aide des paramètres E (développement de l'épikarst), P (propriétés de la couverture protectrice), I (conditions d'infiltration) et K (développement du réseau karstique). Celle-ci sert ensuite à délimiter les zones de protection des eaux souterraines.

La méthode EPIK 2.0 est conçue pour être utilisée dans un système d'information géographique (SIG). En effet, depuis 1998, de nombreuses campagnes ont permis de recueillir des données de base complètes et géoréférencées sur les régions karstiques en s'appuyant sur la méthode EPIK 1.0. Ainsi, il est maintenant possible de délimiter les zones de protection situées dans des aquifères karstiques fortement hétérogènes à l'aide de la méthode EPIK 2.0 en exploitant le plus possible les jeux de données disponibles et en limitant les relevés supplémentaires sur le terrain.

Carlo Scapozza, chef de la division Hydrologie
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

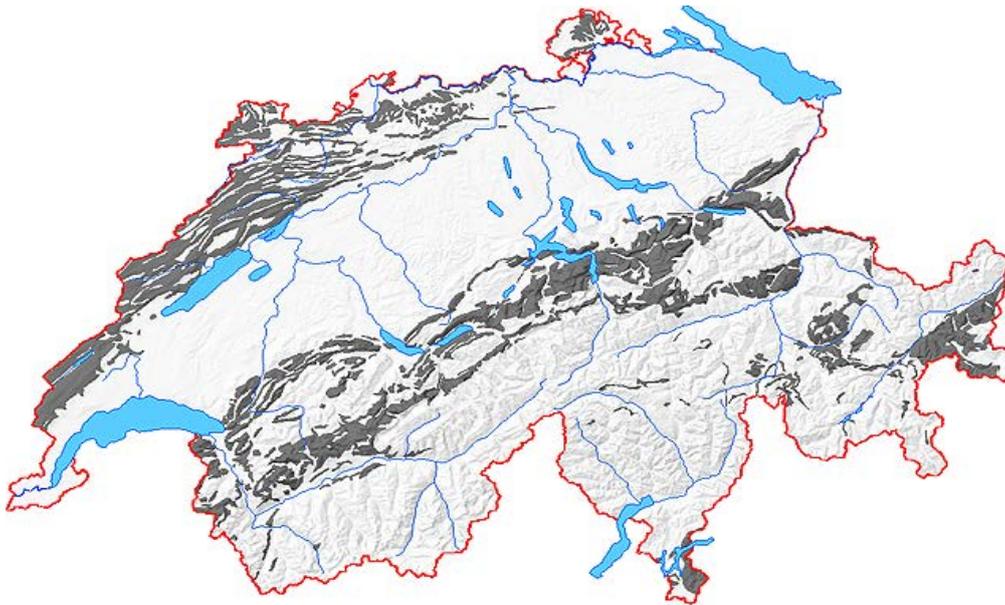
1 Introduction

1.1 Contexte

Les environnements karstiques (figure 1) représentent environ 20 % de la surface du territoire suisse et fournissent quelque 20 % de la quantité d'eau potable de notre pays (estimation). Dans certaines régions (cantons de Neuchâtel et du Jura, p. ex.), la majorité de l'eau de consommation provient de ce type d'aquifère.

Figure 1

Répartition des terrains karstiques : environ 20 % de la surface de la Suisse est constituée de roches karstifiées.



Les eaux dans le karst circulent principalement dans un réseau de chenaux naturels et peuvent parcourir rapidement de longues distances. Les sources présentent ainsi généralement des bassins étendus (plusieurs dizaines de km²) et des débits importants, même en conditions d'étiage (plusieurs dizaines à centaines de l/s). Le temps de séjour et donc la filtration de l'eau y sont cependant limités, particulièrement en hautes eaux, où la qualité de l'eau est souvent altérée par des bactéries, de la turbidité ou des matières organiques.

Ces caractéristiques concernent essentiellement les captages issus d'exutoires naturels, qui constituent une grande proportion des ressources exploitées actuellement.

Les captages par forages ou galeries, issus de zones noyées importantes et/ou profondes présentent moins de variations de qualité de l'eau en raison de temps de séjour plus longs (vitesses d'écoulement plus faibles).

Pour des raisons géographiques, une grande partie des bassins d'alimentation des captages exploités en milieu karstique sont situés dans des régions de moyenne montagne où les modes d'exploitation du sol sont peu intensifs (élevage, pâturage, cultures extensives). Les apports de polluants persistants (produits phytosanitaires, contaminations liées aux activités industrielles, etc.) y sont moins marqués que pour d'autres types d'aquifères situés en régions de plaine. En outre, le fort taux d'infiltration des eaux météoriques et le temps de séjour relativement faible de l'eau sous terre évitent le cumul des substances sur de longues périodes. Certaines régions fortement industrialisées ou agricoles ne sont cependant pas épargnées.

Dans la plupart des cas, les eaux issues des aquifères karstiques sont distribuées avec un traitement simple (antibactérien) ou plus complet (ultrafiltration).

Comme l'indique la figure 1, les régions karstiques se répartissent le long du Jura, le long de la bordure nord des Alpes (nappes des Préalpes et Alpes helvétiques) et dans les nappes grisonnes, ainsi qu'au sud du Tessin.

Les couches calcaires constituant les aquifères karstiques principaux sont parfois recouvertes de formations non karstiques qui peuvent cependant aussi participer à la recharge de ces aquifères. L'extension des bassins karstiques est donc supérieure à la surface des affleurements. Plusieurs cantons ont établi des « cartes du karst » indiquant la distribution des affleurements karstiques et des zones non karstiques alimentant le karst¹.

Les captages d'eau des aquifères karstiques sont essentiellement de trois types :

- 1) captage direct ou indirect d'une source,
- 2) galerie de captage,
- 3) puits de pompage.

Dans le cas du captage d'une source, le système d'écoulement souterrain naturel n'est pas ou n'est que très peu perturbé par le captage. En effet, dans ce cas, seule une partie de l'eau s'écoulant naturellement est déviée vers le système d'alimentation en eau potable.

Dans le cas d'une galerie de captage, celle-ci est généralement forée sous le niveau naturel de la zone noyée, impliquant le drainage et l'abaissement de celle-ci. L'abaissement est fixé par l'altitude de la galerie et il est stable dans le temps. Le système d'écoulement souterrain naturel est donc perturbé par le drain, impliquant généralement une baisse de débit ou l'assèchement des exutoires naturels.

Les puits de pompage extraient également l'eau sous le niveau naturel de la zone noyée, mais l'abaissement est généralement variable, car le pompage n'est pas continu. Les perturbations induites sont donc variables dans le temps.

Les galeries de captage et les puits de pompage prélèvent de l'eau qui se trouve en partie dans les volumes peu perméables de la masse calcaire entourant les conduits karstiques. Toutefois, dans la plupart des cas, si le captage a un débit intéressant (> 5 l/s), c'est que le puits ou la galerie recoupe des petits conduits ou des fissures qui sont bien reliés au réseau de conduits karstiques drainant naturellement le massif.

¹ La délimitation des aquifères karstiques selon la loi fédérale sur la géoinformation (LGéo) est en cours dans certains cantons.

1.2 Cadre légal

En 2016, l'adaptation de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) précise que, *dans les aquifères karstiques ou fissurés fortement hétérogènes*, les zones de protection des eaux souterraines se composent des zones S1 et S2, et des zones Sh et Sm (*Annexe 4, ch. 121, al. 1, let. b, OEaux, OFEV 2022*).

La méthode EPIK 2.0 a pour objectif de fournir une aide pratique pour la délimitation des zones et des secteurs de protection, mais se limite aux aquifères karstiques fortement hétérogènes. La méthode DISCO (Pochon & Zwahlen, 2003) couvre quant à elle le cas des aquifères fissurés fortement hétérogènes.

L'annexe 4 de l'ordonnance définit les objectifs de qualité et les conditions à appliquer pour chacun de ces types de zones et pour les deux secteurs, dans le cas des aquifères karstiques (S1, S2, Sh, Sm, Au / Ao).

Pour la zone S1 en milieu karstique fortement hétérogène, l'annexe 4 précise qu'outre les dispositions standard (environnement immédiat du captage), elle doit inclure les pertes alimentant de manière concentrée le captage, ainsi que l'environnement immédiat (voir les détails à l'annexe 4).

Concernant les zones Sh et Sm, l'annexe 4 précise que « la zone Sh couvre les secteurs à haute vulnérabilité », tandis que « la zone Sm couvre les secteurs de vulnérabilité moyenne ou faible dans le bassin versant² d'un captage ». La délimitation est donc basée sur l'évaluation de la vulnérabilité, sans que ce terme soit défini explicitement dans l'ordonnance ou ses annexes.

C'est pourquoi nous avons choisi de définir la notion de vulnérabilité au chapitre suivant. La manière de définir des classes de vulnérabilité faible, moyenne ou élevée est présentée au chapitre 4.8.

La définition complète d'un milieu karstique ou fissuré fortement hétérogène est donnée dans OFEV (2022). Elle est brièvement rappelée au chapitre 2.

Les règles et les restrictions applicables aux zones de protection en milieu fortement hétérogène sont décrites dans le même document (OFEV, 2022).

1.3 Vulnérabilité des eaux d'un captage aux pollutions

Le terme de vulnérabilité est défini et utilisé de manières très diverses dans la littérature scientifique. En hydrogéologie, et plus particulièrement dans le cadre des lois et des recommandations sur la protection des eaux des captages d'eau potable, la définition suivante a été admise : « la vulnérabilité est une propriété intrinsèque des aquifères, qui dépend de la sensibilité de ces derniers aux impacts naturels et anthropogènes (Gilbrich et Zaporozec, 1994). Il s'agit d'une propriété non mesurable directement, qui doit pouvoir être définie pour tout point du bassin d'alimentation d'un captage ou d'une source. Elle est estimée à partir d'informations géologiques et hydrogéologiques. Elle prend en compte trois facteurs (Brouyères et al., 2001, Jeannin et al., 2001) : l'atténuation du polluant (concentration maximale), le temps de transit (durée entre l'infiltration du polluant et son arrivée au captage) et, dans une certaine mesure, la durée de la pollution.

² Le terme « bassin versant » est en principe réservé aux bassins alimentant les cours d'eau de surface. Pour les sources et les captages des eaux souterraines, le terme « bassin d'alimentation » est utilisé (OFEFP, 2004).

Le concept de vulnérabilité a été développé essentiellement en lien avec un scénario de pollution ponctuelle dans le temps et dans l'espace : purinage intempestif sur une parcelle donnée, accident avec un camion d'hydrocarbures ou fuite d'un réservoir de produits polluants. Le but est d'identifier, au sein du bassin d'alimentation d'un captage, les points à partir desquels le danger de pollution est le plus élevé en cas de pollution accidentelle. Une vulnérabilité faible est admise si le polluant est très fortement atténué, arrive au captage longtemps après l'événement et ne pollue la source que pendant peu de temps. À l'inverse, une vulnérabilité élevée est admise si le polluant arrive rapidement et de manière concentrée au captage.

Pour éviter toute confusion, notons qu'il existe une carte « Vulnérabilité des réservoirs aquifères » au 1:500 000 ayant pour but de représenter la sensibilité des réservoirs aquifères aux menaces possibles par des polluants à l'échelle nationale. Elle a pour base une méthode d'évaluation multicritère qui utilise la carte des réservoirs aquifères, la carte des aptitudes des sols ainsi que d'autres données hydrogéologiques. L'évaluation multicritère pour la détermination de la vulnérabilité en roche cohérente repose principalement sur l'effet protecteur du sol et, si des informations sont disponibles, sur l'effet protecteur d'une couverture de roches meubles peu perméables. En général, un effet protecteur faible à modéré est attribué aux roches cohérentes fissurées et en partie karstifiées. La vulnérabilité des aquifères présentée dans la carte 1:500 000 a donc été estimée avec une méthodologie différente et notablement simplifiée. Elle n'est pas directement comparable aux résultats de la méthode EPIK 2.0.

2 Généralités sur le karst

L'environnement karstique est caractérisé par un paysage et une hydrologie particuliers qui sont liés à la dissolution du substratum rocheux dans les eaux météoriques et souterraines. En Suisse, la plupart des régions karstiques se développent dans les calcaires, localement également dans des dolomies, du gypse et même du sel (halite).

Morphologiquement, la karstification se traduit par la présence de dolines, de lapiaz, de vallées fermées, de grottes et de gouffres. Du point de vue hydrologique, l'absence de cours d'eau en surface, l'existence d'importantes sources dans les vallées et la présence de pertes de cours d'eau dans le sous-sol traduisent la perméabilité importante induite par la dissolution du substratum rocheux.

Ces éléments caractéristiques peuvent être plus ou moins visibles et reconnus. Leur absence ne permet en aucun cas d'en déduire la non-karstification d'un massif. À moins de disposer d'évidences solides qu'un massif carbonaté ou gypseux n'est pas karstifié, il est conseillé d'admettre que la dissolution a eu un temps suffisant pour agir et qu'un système karstique s'y est développé. Le cas des aquifères karstiques faiblement hétérogènes envisagé dans l'ordonnance est donc à considérer comme exceptionnel et devrait être validé par des tests et des données ciblées.

2.1 Systèmes d'écoulements souterrains en milieu karstique et leur vulnérabilité

2.1.1 Systèmes d'écoulements souterrains

L'élément le plus déterminant et le plus facile à identifier dans un massif karstique est souvent la « source karstique », qui est généralement assez ponctuelle et spectaculaire, mais peut aussi être constituée de plusieurs exutoires ou même se cacher sous les alluvions d'une vallée.

Les bassins d'alimentation des sources karstiques sont généralement étendus (typiquement de 1 à 100 km² dans notre pays), induisant des débits significatifs, compris entre quelques dizaines de l/s à plusieurs dizaines de m³/s. Les hydrogrammes des sources sont souvent très variables (crues rapides et violentes, décrue rapide, tarissement lent). De même, la qualité des eaux varie souvent en fonction du débit.

Le système d'écoulement souterrain correspond aux multiples cheminements des eaux qui relient le bassin d'alimentation à la source. Comme le montre la figure 2, la circulation des eaux dans les massifs karstiques est conditionnée par la présence d'un réseau de conduits karstiques où circule l'essentiel de l'eau. Le réseau est formé de chenaux qui se sont développés naturellement pour drainer les eaux vers les exutoires, ponctuels et peu nombreux, du système (sources karstiques). Sous le niveau des exutoires, le réseau est noyé et les conduits sont globalement orientés pour suivre le chemin de moindre résistance hydraulique vers l'exutoire. En crue, l'eau monte souvent de plusieurs dizaines de mètres dans les conduits karstiques, noyant des conduits subhorizontaux qui sont secs en basses eaux (zone épiphréatique). Au-dessus, dans la zone vadose ou non saturée, les conduits sont globalement verticaux, faisant transiter les eaux infiltrées vers la zone noyée / épinoyée. L'infiltration des eaux dans les massifs karstiques est conditionnée par la présence de pertes ponctuelles de ruisseaux ou de rivières qui cascaded verticalement vers la zone noyée. Il s'agit toutefois d'un cas extrême, car dans la plupart des systèmes, l'infiltration des eaux est diffuse, c'est-à-dire que la surface des calcaires est altérée (fissures,

délitage, petits conduits), formant un épikarst capable d'absorber rapidement une importante quantité d'eau de précipitation. Comme le montre de manière schématique la figure 3, l'épikarst est drainé par des conduits verticaux où l'eau cascade à travers la zone non saturée et rejoint les conduits de la zone noyée où l'eau s'écoule horizontalement en direction de l'exutoire. Le réseau karstique se développe donc naturellement par dissolution pour drainer efficacement les eaux de pluie vers les exutoires.

Le drainage n'est toutefois pas instantané, de sorte qu'une partie de l'eau est stockée temporairement dans différents réservoirs, visibles sur la figure 2. Ceux-ci sont essentiellement de deux types :

- les volumes de calcaires fissurés peu perméables entourant le réseau karstique dans la zone noyée et épinoyée,
- les volumes peu perméables, perchés en périodes de basses eaux, situés dans l'épikarst et la zone non saturée.

Ces réservoirs soutiennent les débits d'étiage des exutoires karstiques, qui peuvent perdurer pendant plusieurs mois sans recharge.

2.1.2 Temps de séjour et vulnérabilité

Il en ressort que le transit d'une pollution entre un point du bassin d'alimentation et une source pourra s'avérer très rapide en période de hautes eaux (généralement quelques heures à quelques jours), mais nettement plus lent en période d'étiage (souvent plusieurs mois). Une différence notable est à relever sur ces variations entre le cas d'une perte, où la circulation reste active en basses eaux, et les zones à infiltration diffuse, où la circulation d'eau d'infiltration peut être quasiment stoppée pendant plusieurs semaines dans le sol, l'épikarst ou la zone non saturée. Pour l'évaluation EPIK 2.0, on se référera, sauf raison particulière, à une situation de moyennes eaux. Les pertes sont ainsi dans tous les cas des points à partir desquels un polluant transitera assez rapidement vers les exutoires, aussi bien en basses qu'en hautes eaux. Le temps de transit et la dilution (atténuation d'une éventuelle pollution) dépendent donc de la distance jusqu'à l'exutoire ainsi que des proportions du débit provenant de la perte par rapport au débit total du système.

Même dans un système à l'état naturel, la qualité des eaux karstiques présente une certaine variabilité. Si certains polluants tels que les hydrocarbures ou les solvants chlorés n'y sont en principe jamais présents, d'autres tels que les bactéries ou la matière organique y sont détectés régulièrement, généralement en lien avec les périodes de hautes eaux.

Dans tous les cas, la capacité de rétention / filtration du système est l'élément-clé qui détermine la facilité ou la quantité de polluant qui arrivera au captage. C'est cette capacité de rétention / filtration qui est évaluée par l'indice de vulnérabilité.

La limite de l'approche proposée est que si un polluant s'infiltré dans un endroit jugé moyennement vulnérable, il ne polluera pas le captage de manière significative. À l'inverse, s'il s'infiltré à une multitude d'endroits moyennement vulnérables simultanément, il finira par dégrader notablement la qualité de l'eau du captage. L'approche est donc développée pour se prémunir contre des pollutions ponctuelles dans le temps et dans l'espace.

Un autre élément à considérer est que certains polluants subissent une réelle atténuation dans l'aquifère (dégradation, adsorption), alors que d'autres sont seulement retardés et dispersés. La vulnérabilité intrinsèque

ne distinguant en principe pas les différents polluants, c'est avant tout le pouvoir de dispersion et de dilution qui est pris en compte.

Figure 2

À gauche, schéma des écoulements dans les différentes zones hydrogéologiques constituant les systèmes d'écoulements souterrains karstiques : sol, épikarst, zone non saturée, zone épiphréatique, zone noyée.

À droite, représentation en sous-systèmes, avec leurs interactions.

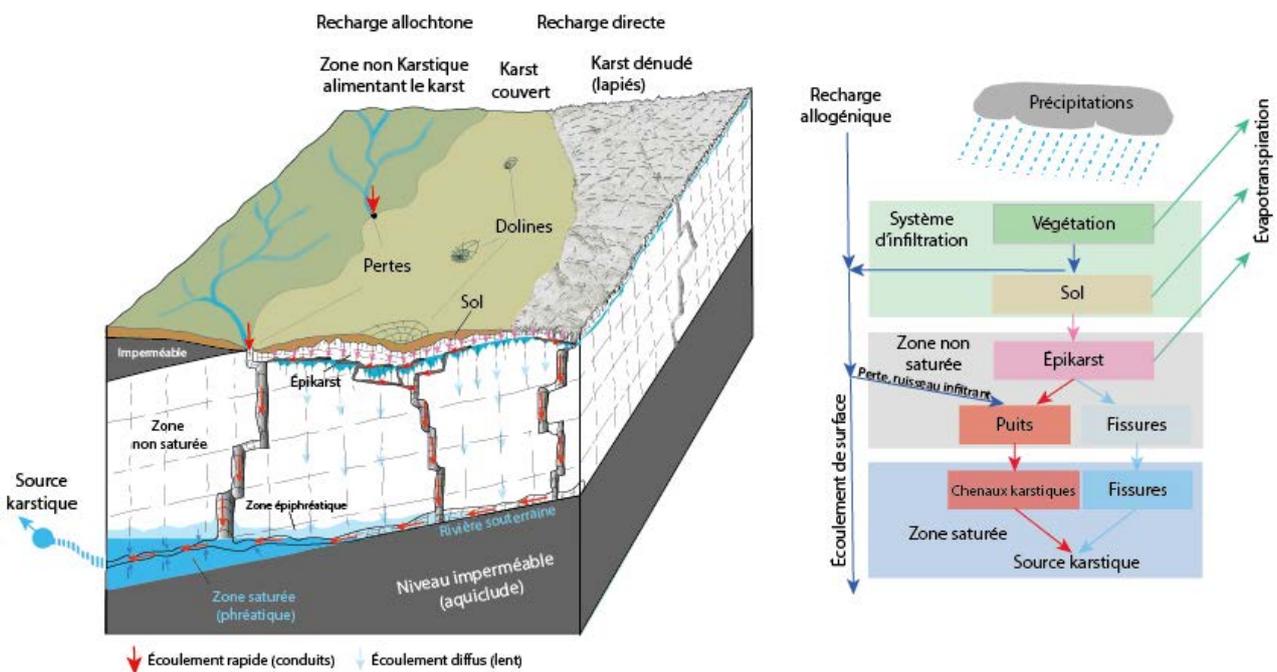
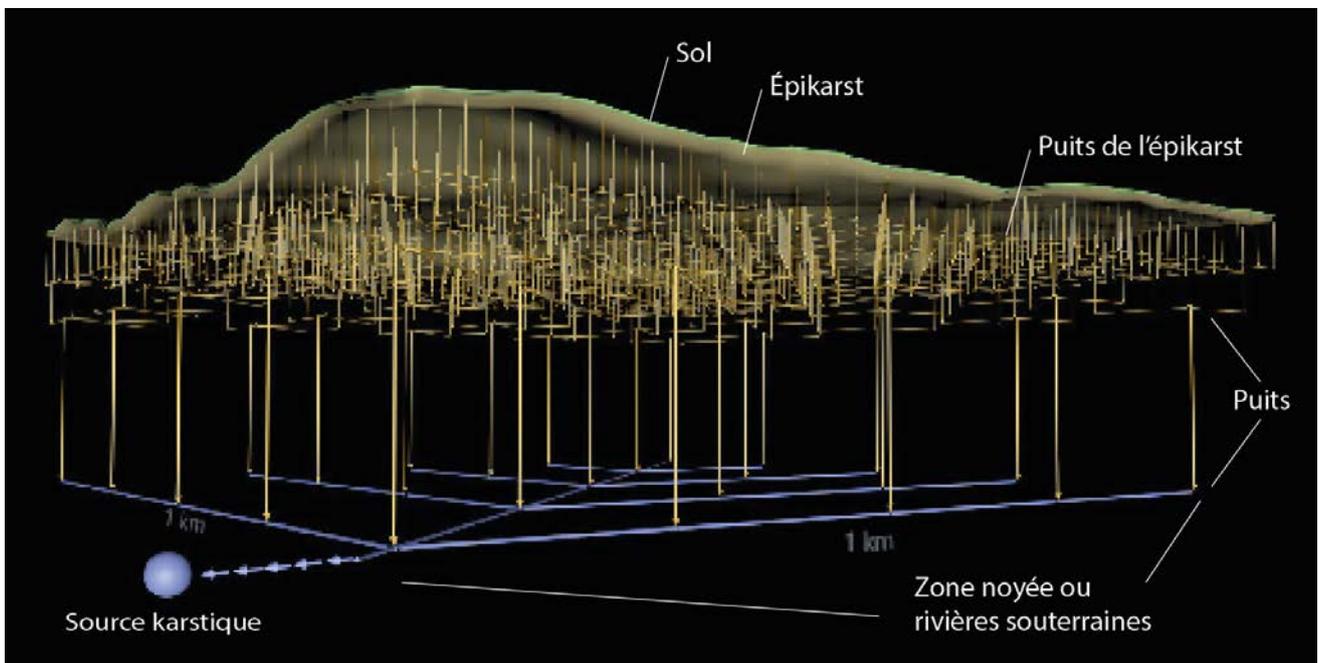


Figure 3

Schéma d'un réseau de conduits sous 1 km² de surface karstique.



3 Choix de la méthode d'évaluation

3.1 Introduction

L'OEaux distingue les aquifères karstiques ou fissurés et, pour chacun d'eux, s'ils sont faiblement ou fortement hétérogènes.

Le guide pratique pour la délimitation des zones de protection en milieu fissuré (Pochon & Zwahlen, 2003) couvre le cas des aquifères fissurés fortement et faiblement hétérogènes (méthode DISCO).

La méthode EPIK 2.0 (présent document) couvre le cas des aquifères karstiques fortement hétérogènes. Le chapitre 3.3 ci-après indique comment traiter le cas des aquifères karstiques faiblement hétérogènes.

Il convient ici d'une part de définir assez clairement la limite entre les aquifères fissurés et les aquifères karstiques, d'autre part de déterminer parmi ces derniers ceux qui sont faiblement ou fortement hétérogènes (voir le chapitre 3.2).

3.2 Aquifères karstiques ou fissurés

Il n'est pas toujours facile de distinguer un massif fissuré d'un massif karstique. Le critère objectif de distinction est l'existence de conduits karstiques, c'est-à-dire d'un réseau de chenaux naturels formés par dissolution et dont l'ouverture dépasse 1 cm (Klimchouk et al., 2000). Si le critère objectif est facile à exprimer, il est nettement plus difficile à identifier sur le terrain. Cependant, si la roche est karstifiable, le développement de la karstification est un phénomène relativement rapide à l'échelle géologique. C'est donc principalement la lithologie qui permettra d'évaluer si un massif est karstique ou non. L'annexe 1 donne une liste indicative de la probabilité de karstification des principales formations géologiques en Suisse.

De manière générale, on peut admettre que les calcaires et les dolomies sont karstifiés, du moins s'ils sont exposés à la surface (eaux météoriques) depuis plusieurs dizaines de milliers d'années. Les roches carbonatées non karstifiées, qui devraient être considérées comme des massifs fissurés, sont donc des exceptions. Pour les considérer comme tels, il convient de trouver des arguments basés sur des observations. Le gypse et le sel sont en principe karstifiés, mais généralement inutilisables comme ressource en eau potable en raison de leur forte teneur en ions dissous.

Les roches entièrement silicatées (gneiss, granits, quartzites, arkoses, etc.) doivent généralement être considérées comme non karstifiées. La karstification de ces roches n'est pas impossible, mais nécessite un temps d'exposition très long (plusieurs centaines de millions d'années), incompatible avec l'évolution rapide du paysage montagneux suisse.

Les grès ou les marnes, qui présentent une part non négligeable de minéraux carbonatés dans leur composition, ont un statut intermédiaire. En effet, la dissolution y joue un certain rôle, mais il n'est pas toujours clair qu'un véritable réseau karstique puisse s'y développer à l'échelle kilométrique. Il convient donc de faire appel à l'appréciation de l'hydrogéologue de terrain pour ces lithologies. Celui-ci devra évaluer s'il convient plutôt d'appliquer la méthode EPIK 2.0 ou la méthode DISCO, ou encore admettre que le milieu doit être considéré comme faiblement hétérogène. Pour ces situations, l'approche présentée par Pochon & Zwahlen (2003) constitue une bonne base. Il est assez peu probable qu'il soit nécessaire d'appliquer EPIK 2.0 dans ces terrains où la couverture est généralement plus importante que sur les calcaires purs.

3.3 Aquifère karstiques faiblement ou fortement hétérogènes

La karstification induit forcément une très forte hétérogénéité des perméabilités entre des conduits très perméables et une matrice rocheuse qui l'est beaucoup moins. L'OEaux sous-entend l'existence de milieux certes karstifiés, mais où le temps de transit des eaux dans le sous-sol est long et globalement dépendant de la distance à l'exutoire. Une telle situation est imaginable dans certains calcaires très poreux (craie, p. ex.), dans un grès à ciment calcaire avec une porosité de matrice élevée ou éventuellement dans une dolomie très poreuse. Ce type de formation géologique n'est pas fréquent en Suisse, mais pas exclu. Dans de tels cas, il est conseillé de délimiter les zones de protection en appliquant l'approche DISCO proposée par Pochon & Zwahlen (2003). À noter que les résultats ne seront pas fondamentalement différents si la méthode DISCO est appliquée au lieu d'EPIK 2.0, en particulier s'il n'y a pas de pertes recensées dans le bassin d'alimentation (infiltration diffuse).

En résumé, dans une large majorité des cas, les massifs calcaires doivent être *a priori* considérés comme karstiques et fortement hétérogènes. Les dolomies, les craies et les grès à ciment calcaires sont aussi en principe karstifiés, mais peuvent tendre vers des systèmes fissurés avec une porosité de matrice non négligeable qui pourrait conduire l'hydrogéologue à plutôt utiliser la méthode DISCO ou celle des isochrones (Pochon & Zwahlen, 2003).

4 Évaluation de la vulnérabilité en milieu karstique fortement hétérogène et transformation en zones de protection des eaux, EPIK 2.0

4.1 Contexte, différence entre EPIK 1.0 et EPIK 2.0

La méthode de cartographie de la vulnérabilité EPIK 1.0 (Doerfliger & Zwahlen, 1998) a été développée pour fournir un outil de délimitation des zones de protection des eaux souterraines spécifiquement adapté à l'hydrogéologie des milieux karstiques. L'évolution de la législation et des ordonnances fédérales dans le domaine de la protection des eaux, en particulier l'introduction de zones Sh et Sm, de même que les retours d'expérience relatifs aux cas d'application et l'évolution des connaissances sur l'hydrogéologie des systèmes karstiques impliquent des ajustements de la méthode initiale.

Ils concernent principalement l'évaluation des paramètres et leur combinaison, en particulier les points suivants :

1. Combinaison des paramètres tenant mieux compte du cheminement des eaux entre la surface (zone d'infiltration) et le captage à protéger
2. Caractérisation plus détaillée de la couverture protectrice (paramètre P), avec trois classes de perméabilité et une prise en compte plus précise des épaisseurs
3. Évaluation plus prudente / mieux documentée de l'effet protecteur de l'épikarst (paramètre E) en cas d'absence de morphologie karstique particulière
4. Définition des conditions d'infiltration (paramètre I) en deux étapes (localisation des zones d'infiltration concentrée, puis détermination de surfaces effectives les alimentant par ruissellement)
5. Détermination de l'effet protecteur du réseau karstique (paramètre K), essentiellement sur la base d'une estimation des temps de séjour et donc de la distance parcourue par les eaux

Le modèle conceptuel de fonctionnement du karst ayant servi de base au développement de la méthode (chapitre 2) n'a pas fondamentalement changé, mais c'est la manière d'évaluer les paramètres qui a évolué. Le principe général admis et la manière d'évaluer chacun des paramètres sont décrits ci-après.

Relevons encore que l'approche EPIK 1.0 de 1998 était principalement basée sur une cartographie sur le terrain des trois paramètres E, P et I. Avec EPIK 2.0, le principe général est de commencer par créer une carte des quatre paramètres E, P, I et K dans un système d'information géographique (SIG) à partir des données existantes. Ce faisant, il apparaîtra assez clairement que certaines données sont insuffisantes, en particulier en

ce qui concerne l'existence et la localisation des pertes. Des travaux de terrain seront donc effectués pour combler ces lacunes, puis pour vérifier la validité des cartes produites.

4.2 Principe

Une condition préalable à l'application de la méthode EPIK 2.0 est de connaître la délimitation du bassin d'alimentation de la source / du captage. L'annexe 2 esquisse la manière de procéder. L'approche de cartographie de la vulnérabilité (figure 4) a pour but de déterminer en tout point du bassin d'alimentation un facteur de protection. Celui-ci prend en compte le cheminement de l'eau entre la surface du sol et le point de prélèvement de l'eau potable (figure 5). Le facteur de protection est principalement proportionnel au temps de transit de l'eau, durée qui définit l'atténuation, le temps d'arrivée et la durée d'une pollution potentielle. Selon les caractéristiques des systèmes d'écoulements karstiques, la vulnérabilité dépend donc essentiellement :

1. des conditions d'infiltration de l'aquifère (perte, infiltration diffuse plutôt rapide ou plutôt lente),
2. de la durée du transit de l'eau dans les sous-systèmes traversés par les eaux,
3. de la dilution du polluant dans le débit total du système.

Figure 4

Schéma de principe de l'approche EPIK tel que défini dans les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP 2004).

Les zones S1 à S3 ne correspondent plus aux exigences actuelles.

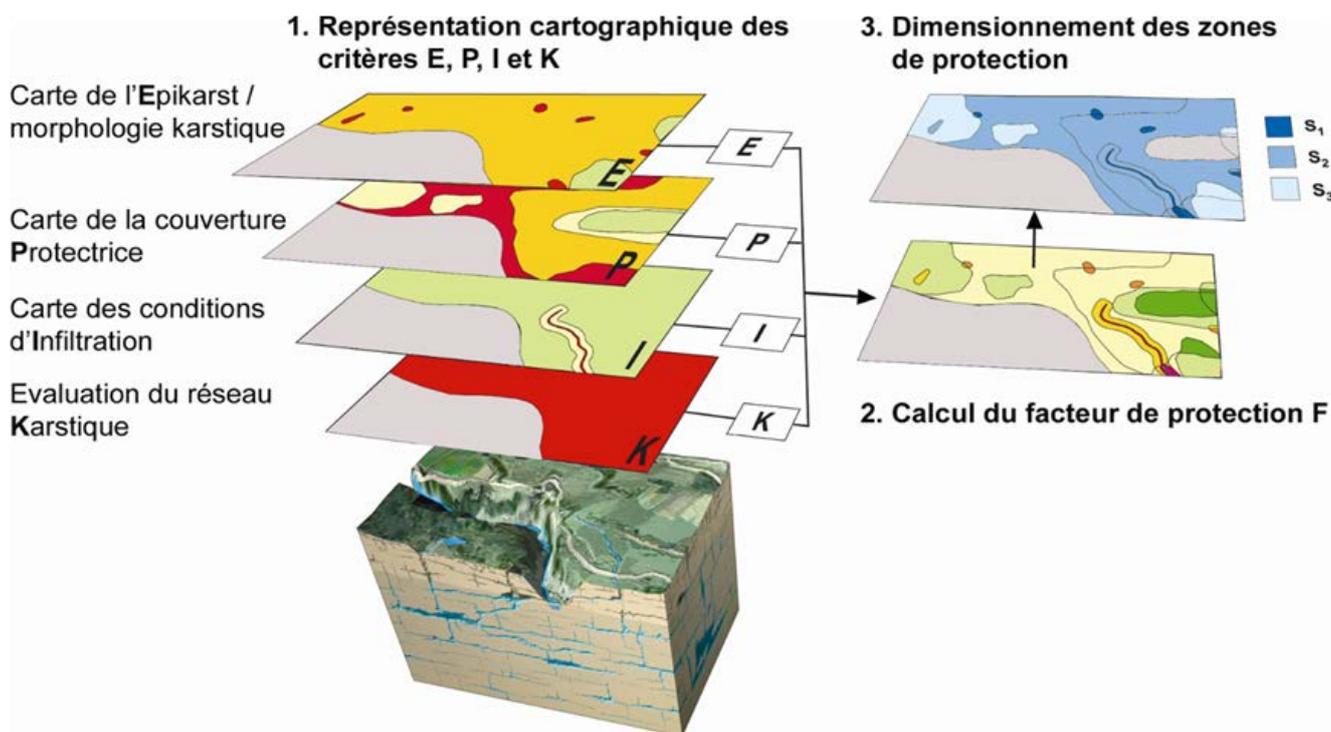
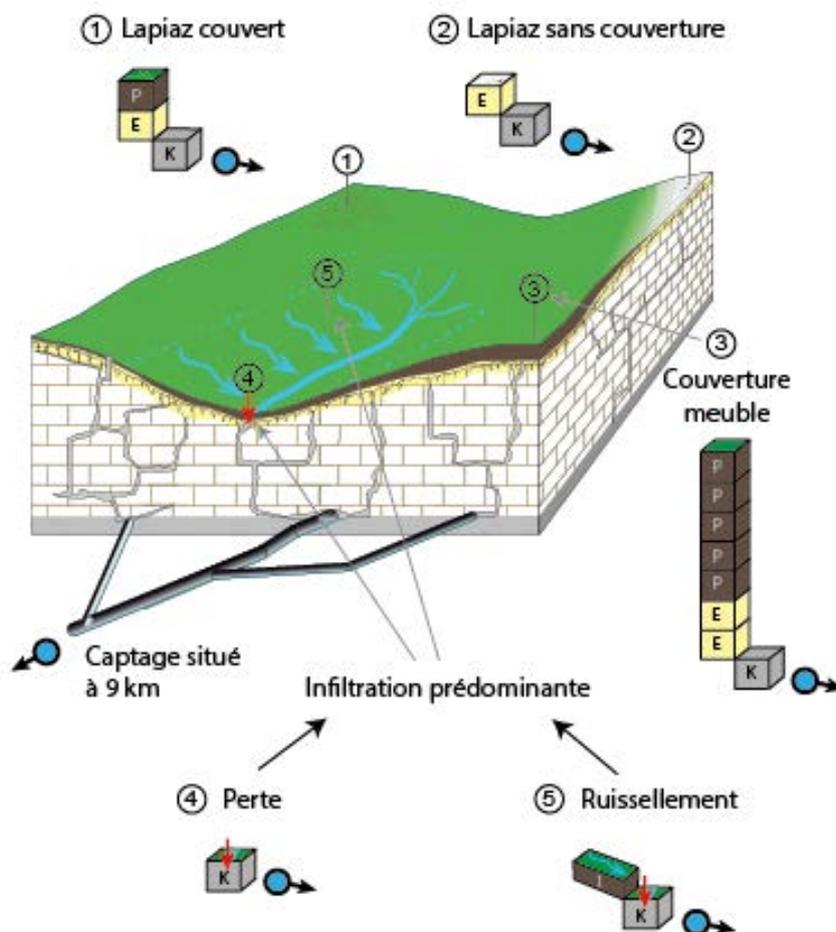


Figure 5

Principe de la méthode EPIK 2.0 : évaluation du « facteur de protection » donné par les différents sous-systèmes traversés par les eaux entre un point du bassin d'alimentation et le captage.



L'infiltration est surtout contrôlée par la présence ou non de perte. En cas d'infiltration diffuse, elle est contrôlée par les caractéristiques du sol surmontant les calcaires, ainsi que par l'épikarst. Le temps de transit est donc défini par les caractéristiques du sol (P), de l'épikarst (E), du réseau karstique et du lien entre ce dernier et le captage (K). En cas d'infiltration concentrée, les sous-systèmes sol et épikarst sont by-passés et doivent donc être ignorés. Le paramètre I définit donc comment l'eau s'infiltré et dans quelle mesure les paramètres P et E doivent être pris en compte. Dans tous les cas, la dilution du polluant est directement proportionnelle à la proportion de débit de la source qui provient du point de pollution considéré, par rapport au débit total du système. La dilution sera donc plus importante dans un grand bassin que dans un petit.

4.3 Paramètre I (conditions d'infiltration)

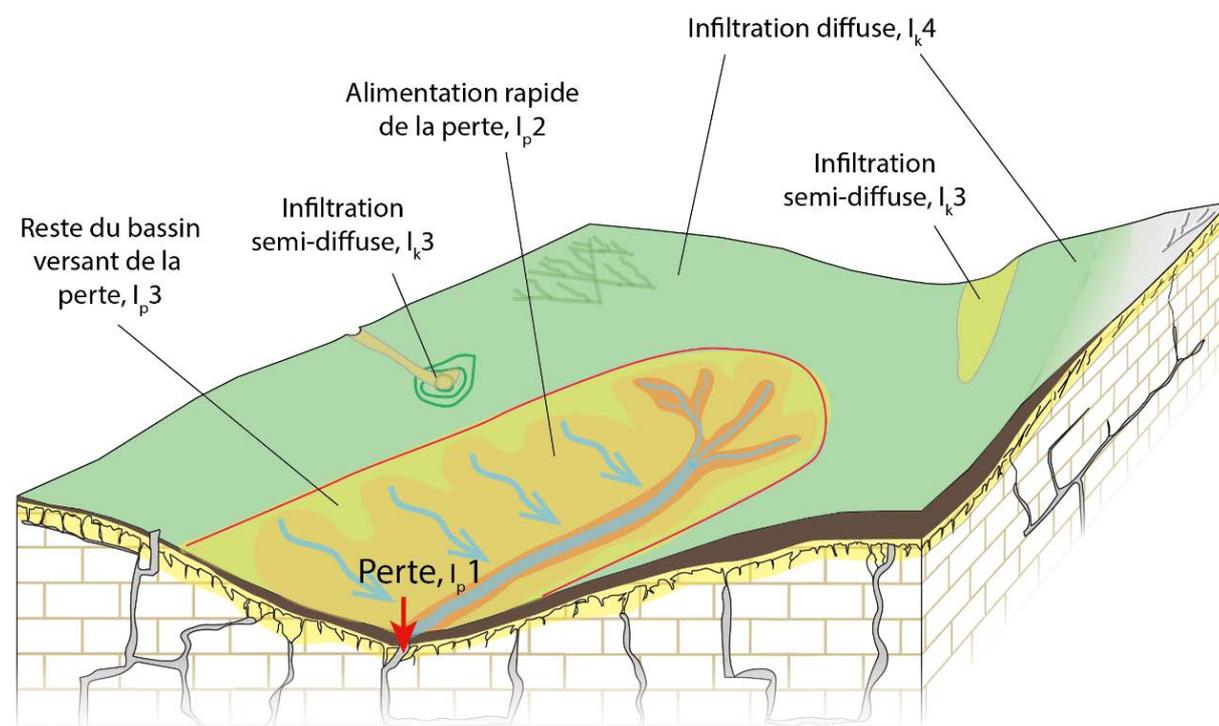
4.3.1 Principe

Dans la plupart des cas, les roches calcaires exposées en surface ou recouvertes par des sols sont suffisamment perméables pour absorber l'essentiel des précipitations.

Figure 6

L'infiltration dans un bassin karstique peut être subdivisée en deux grandes classes :

- 1) infiltration concentrée (avec pertes et cours d'eau les alimentant, I_{p1} à I_{p3}) ;
- 2) infiltration diffuse (I_{k3} à I_{k4}).



À l'autre extrême, les pertes sont des dépressions (dolines ou gouffres) dans lesquelles un cours d'eau (ruisseau ou rivière) se perd sous terre (I_{p1}). À ces endroits, l'eau s'infiltré directement dans le réseau karstique, ne traversant ni le sol ni l'épikarst. Les taux d'infiltration dans les pertes sont généralement très élevés (> 10 l/min par m^2 pendant plusieurs jours après un événement pluvieux, p. ex.). Dans ce cas, le temps de transfert de l'eau entre la perte et la source ou le captage se réduit au temps de passage à travers le réseau karstique. Une certaine protection est cependant liée au trajet de l'eau dans le bassin versant de la perte, qu'il conviendra de prendre en compte.

4.3.2 Méthode d'évaluation

L'évaluation des conditions d'infiltration (I) implique de cartographier le type de recharge (concentrée ou diffuse) et d'évaluer l'effet protecteur associé à chacun de ces types (figure 6, tableau 3).

De manière générale, deux situations peuvent être assez facilement distinguées :

1. les cas où un ruisseau ou une rivière alimentant une perte sont présents de façon plus ou moins pérenne (zones I_p , chapitre 4.3.2.1),
2. les cas où l'infiltration est diffuse dans la roche karstique, mais temporairement ou localement plus concentrée (zones I_k , chapitre 4.3.2.2).

Différentes situations intermédiaires existent entre les infiltrations purement diffuses et les pertes bien identifiables.

4.3.2.1 Infiltration concentrée, pertes de cours d'eau (I_p)

Pour les pertes, complètes ou partielles, la protection provient principalement du transfert de l'eau dans les sols du bassin alimentant le cours d'eau et ses affluents (écoulements de subsurface dans les sols). Pour évaluer l'indice de protection, on estimera donc la part de ces écoulements par rapport à la composante de pur ruissellement.

La toute première difficulté est que, dans la plupart des cas, les pertes ne sont pas inventoriées ou cartographiées. On peut se servir des cartes topographiques et du réseau hydrographique pour s'orienter, mais il faudra généralement prévoir d'aller sur le terrain pour les identifier. Pour les pertes partielles ou temporaires, l'exercice est souvent plus difficile et se basera sur des hypothèses qu'il conviendra d'étayer par des essais de traçage (antérieurs ou à réaliser), ou par des mesures de débit amont-aval.

Une fois les pertes identifiées, on cartographiera les cours d'eau qui les alimentent et on admettra que le lit et les berges très proches n'apportent aucune protection (tableau 1). Cette zone correspond à la classe I_{p1} , avec zéro point de protection.

Entre les bras des cours d'eau et au-delà du lit du cours d'eau (10 m de l'axe ou cartographie plus précise), on admettra 1 point de protection pour 25 mètres de distance si le taux de ruissellement est fort (tableau 2) et 1 point pour 12,5 mètres de distance si le taux de ruissellement est modéré. La zone de berge (0 point de protection) est donc soit incluse dans les 10 mètres de distance à l'axe du cours d'eau admis par défaut, soit définie plus finement par l'hydrogéologue. Les bandes suivantes correspondent à la classe I_{p2} , avec une protection comprise entre 1 et 8 points en fonction de la distance au cours d'eau. À moins d'éléments très particuliers, un maximum de 8 points de protection est attribuable, ce qui correspond à des distances de 200 à 400 mètres entre les bras des cours d'eau.

Le reste du bassin versant du cours d'eau est placé dans la classe I_{p3} , avec une protection équivalente à 8 points.

Attention : les zones I_{p2} et I_{p3} s'étendent jusqu'aux limites du bassin versant hydrologique de la perte, qui doit donc être délimité préalablement par l'hydrogéologue. Il ne correspond généralement pas au bassin versant topographique du cours d'eau, mais uniquement à la zone moyennement à peu perméable qui l'alimente effectivement.

Tableau 1

Paramètre I : points de protection dans les bassins versants de pertes (I1, I2)

Estimation des points de protection dans le bassin versant de pertes diffuses et/ou partielles (ne concerne que les classes I_k). Les conditions de ruissellement fort ou modéré sont indiquées au tableau 2.

	Pts de protection	Extension maximale
Lit et berge du cours d'eau	0 pt	Tous les lits des cours d'eau se perdent dans le karst. Par défaut, on admettra 10 m de large autour de l'axe du cours d'eau donné par Swisstopo (TLM3D). Pour une étude de détail, l'hydrogéologue pourra décider de tenir compte de la position effective de la berge.
Bassin versant avec fort ruissellement	+ 1 pt pour 25 m	Sauf arguments spécifiques, au maximum 200 m ou 8 points de protection
Bassin versant avec ruissellement modéré	+ 1 pt pour 12,5 m	Sauf arguments spécifiques, au maximum 100 m ou 8 points de protection

Dans le cas d'une perte diffuse et/ou partielle (typiquement, un cours d'eau perdant une partie de son débit sur plusieurs centaines de mètres), l'hydrogéologue appliquera la même approche, mais pourrait ajouter quelques points de protection au cours d'eau lui-même si la perte est très partielle. De même, si les cours d'eau alimentant les pertes sont très étendus, l'hydrogéologue pourrait décider d'ajouter quelques points de protection aux parties les plus éloignées.

4.3.2.2 Infiltrations diffuse (I_k)

Dans la plupart des cas, l'infiltration des eaux météoriques est entièrement diffuse dans les calcaires (I_{k4}). Les phénomènes de ruissellement y sont peu importants et seuls des événements de précipitation exceptionnels (orage exceptionnel, forte fonte de neige ou pluie sur sol gelé) peuvent générer des ruissellements. Ces situations étant rarissimes, elles ne sont pas prises en compte dans l'évaluation du paramètre I.

Les zones d'infiltration semi-diffuses (I_{k3}) correspondent aux cas où l'infiltration est estimée comme étant au moins trois fois supérieure à la recharge météorique diffuse (I_{k4}). Dans de telles situations, la capacité de protection de la couverture protectrice est réduite par rapport à une situation d'infiltration diffuse. Il s'agit essentiellement du pied de zones pentues, pour lesquelles le ruissellement estimé est modéré ou fort (tableau 2). Il peut par exemple s'agir d'une zone morainique, d'un sol compacté, ou d'une petite zone marneuse. Des ruissellements y sont localement possibles lors d'événements pluvieux. Les eaux météoriques peuvent s'écouler en surface sur quelque distance avant de s'infiltrer. Dans la zone I_{k3}, une réduction d'un facteur 2 de l'addition des paramètres E + P est admise par approximation pour l'ensemble de la zone d'infiltration (généralement pied de pente) et la pente qui l'alimente potentiellement.

La zone I_{k3} inclura les zones peu perméables et pentues inclinées vers une zone karstique et dépassant 50 mètres de largeur, ainsi qu'une bande de 20 mètres de largeur dans la zone karstique, au pied de la pente peu perméable.

Remarque : il arrive que certains points présentent une infiltration très concentrée dépassant temporairement 100 mm/h, mais ne présentant pas d'indices de ruissellement tels qu'un cours d'eau ou un lit de cours d'eau temporaire. Il peut s'agir par exemple d'une installation d'infiltration des eaux claires. Dans ce cas, l'hydrogéologue devra décider s'il place cette zone et celle qui l'alimente en zone I_{k3} ou en zone I_{p1} , I_{p2} ou éventuellement I_{p3} . Il peut aussi s'agir du pied d'une zone où le ruissellement est considéré comme fort (tableau 2) : pied de pente imperméable, bas de vallon pentu.

Tableau 2

Paramètre I : estimation du ruissellement

Tableau indicatif pour l'estimation du ruissellement et du type d'infiltration en fonction de la pente et de la perméabilité du terrain.

Perméabilité sol	Pente		Classe I
	Faible <10%	Forte >10%	
Élevée ($K > 5 \cdot 10^{-4}$ m/s)	Faible	Faible	I_{k4}
Moyenne ($5 \cdot 10^{-4}$ m/s $>$ $K > 5 \cdot 10^{-7}$ m/s)	Faible	Modéré ³	I_{k4} / I_{k3}
Faible ($K < 5 \cdot 10^{-7}$ m/s)	Modéré ⁴	Fort ⁴	I_{k3} / I_p

4.3.3 Aspects pratiques de la délimitation

La détermination du paramètre I se fait selon les principes décrits au tableau 3. Pratiquement, elle s'échelonne en sept étapes principales :

- 1) Cartographie des points d'infiltration concentrée (pertes complètes ou partielles) et des cours d'eau qui les alimentent (I_{p1})⁵
- 2) Délimitation des bassins versants hydrologiques (pas topographiques) des pertes et des cours d'eau associés
- 3) Cartographie des zones I_{p2} et I_{p3} dans les bassins des pertes
- 4) Cartographie des zones où l'infiltration est au moins partiellement concentrée, telles que le pied de zones peu perméables et pentues où le ruissellement est considéré comme fort selon le tableau 2 (ou bassins d'infiltration d'eaux claires)
- 5) Pour chaque zone d'infiltration partiellement concentrée, décision de la placer soit en I_{k3} ou en I_p
- 6) Pour les zones placées en I_p , délimitation des bassins versants alimentant ces zones et cartographie des zones I_{p1} , I_{p2} et I_{p3}
- 7) Placement des autres surfaces considérées comme ayant une infiltration semi-diffuse en I_{k3}
- 8) Prise en compte du reste du bassin d'alimentation du captage / de la source comme zone d'infiltration diffuse I_{k4}

La cartographie est réalisée sur la base d'observations de terrain (localisation des pertes permanentes et temporaires en conditions pluvieuses), et de l'interprétation de données topographiques (pentes, tracés des cours d'eau permanents et temporaires), géologiques (cartes géologiques et structurales) et pédologiques (conductivité hydraulique indicative en surface déterminée pour le paramètre P).

³ Modéré seulement si absence de forêt, sinon faible.

⁴ Seulement si la zone n'est pas déjà incluse dans le bassin d'une perte.

⁵ Dans un premier temps il s'agit de pertes potentielles estimées à partir des données SIG et de la carte du karst (cours d'eau infiltrant). En principe et selon les enjeux, la présence d'une perte devrait être validée/ajustée par des observations directes sur le terrain.

Tableau 3

Classes d'infiltration

Description des classes liées aux conditions d'infiltration (paramètre I).

Bassins versants de pertes (I_p)

Type d'infiltration	Critères	Évaluation des points de protection
I _{p1} Perte directe et cours d'eau	Perte et cours d'eau visibles	E et P sont by-passés (0 pt de protection). Protection I en principe nulle, éventuellement donnée par distance jusqu'à la perte.
I _{p2} Drainages artificiels alimentant une perte	Selon plans de drainages existants, observations directes sur le terrain et/ou modèle du potentiel de drainage (couche agroscope)	E est by-passé (0 pt de protection), les drains eux-mêmes sont assimilables au cours d'eau (0 pt de protection). La protection I de la surface drainée est donnée par « temps jusqu'à la perte » (épaisseur de sol sur les drains et distance).
I _{p2} Zone d'alimentation rapide de la perte	Zone proche du cours d'eau alimentant la perte	La protection est donnée par le « temps jusqu'à la perte » (distance et ruissellement), selon les tableaux 1 et 2, et vaut entre 1 et 7 points de protection.
I _{p3} Alimentation indirecte de la perte	Reste du bassin versant hydrologique de la perte	La protection vaut 8 points jusqu'à la limite du bassin.

Infiltration dans la roche karstique (I_k)

Type d'infiltration	Critères	Évaluation des points de protection
I _{k3} Semi-diffuse	Zone où l'infiltration est au moins trois fois supérieure à l'infiltration diffuse (I _{k4})	La protection est donnée par E+P, divisé par 2.
I _{k4} Diffuse	Absence de ruissellement (reste du bassin d'alimentation du captage)	La protection est donnée par E+P.

4.3.4 Cas des zones marneuses (ou similaire)

Les zones marneuses ou marnocalcaires, parfois aussi dénommées « semi-karstiques », peuvent être considérées de deux manières :

- 1) L'essentiel de l'eau s'infiltré. L'écoulement y est semi-diffus (I_{k3}).
- 2) L'essentiel de l'eau ruisselle et il y a là deux possibilités :
 - a) l'eau s'écoule hors du bassin d'alimentation, dans ce cas la zone peut être retirée de l'étude ;
 - b) l'eau s'écoule vers une zone karstique alimentant le captage, dans ce cas elle est considérée comme le bassin d'alimentation d'une perte (I_{p2} ou I_{p3}).

Dans le cas 1, la protection est donnée par l'addition des paramètres E et P, divisée par deux. La couche d'altération des marnes ayant une bonne capacité de rétention, la valeur du paramètre E suggérée pour les terrains semi-karstiques est de $E = 6$.

4.3.5 Cas des zones drainées artificiellement (drains agricoles dans la plupart des cas)

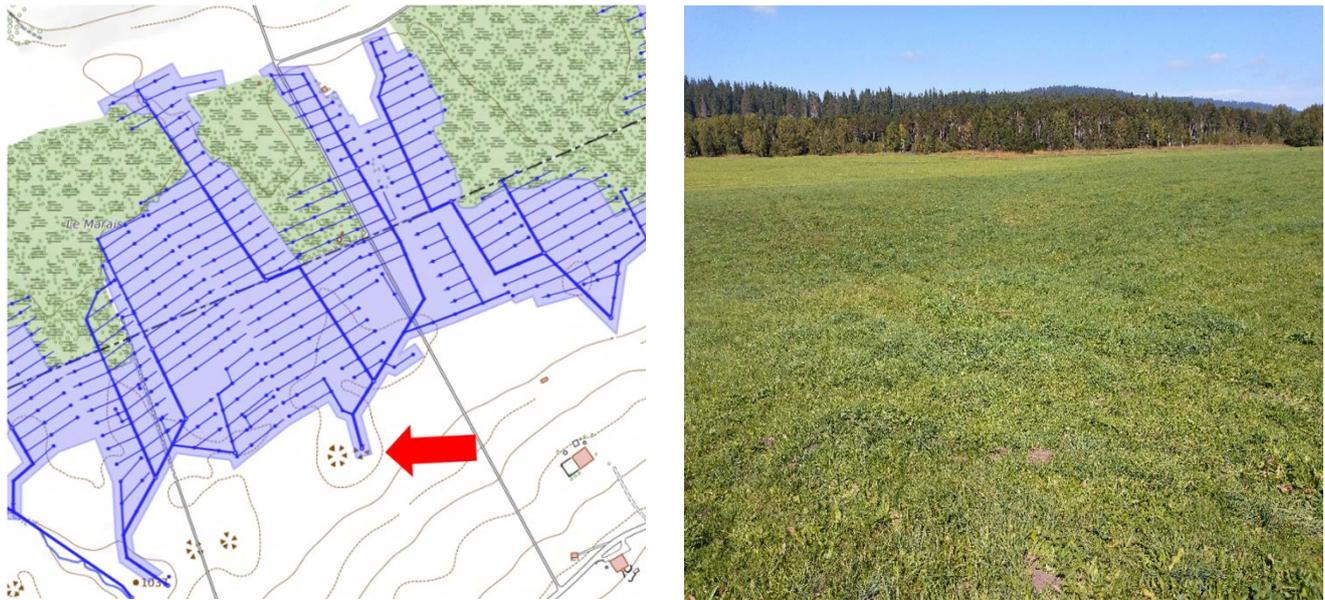
Il n'est pas rare de trouver des zones humides qui ont été drainées artificiellement pour y développer de l'agriculture, dont le réseau de drainage alimente une perte. Dans ce cas, on estimera l'épaisseur du sol traversé par les eaux jusqu'aux drains et on appliquera les valeurs du paramètre P. Le sol étant assez perméable, la protection sera de 1 point dans la plupart des cas, mais pourrait aller jusqu'à 4 points, voire 6 points pour des drains très profonds et/ou des sols considérés comme peu perméables.

Le cas des zones drainées appelle deux remarques :

- 1) Les zones drainées correspondent souvent à d'anciens marais ou à des tourbières présentant des sols riches en matière organique. Le drainage entraîne une dégradation des sols, accompagnée d'un flux de matière organique dissoute dans l'eau des drainages. Cette matière organique est problématique pour la qualité de l'eau des captages, souvent plus que les activités agricoles elles-mêmes.
- 2) Bien souvent, les pertes associées aux zones drainées sont invisibles, le collecteur terminal étant recouvert par la zone agricole, sans qu'il y ait toujours un regard. Il conviendra donc d'étudier assez attentivement les plans des drainages agricoles, en principe disponibles sur les géoportails cantonaux, pour évaluer la position et la taille du bassin versant des pertes.

Figure 7

Plan des drains agricoles (vallée de La Brévine) et vue de la doline sous laquelle le collecteur alimente la perte. La perte est totalement invisible !



Remarque : le traitement du paramètre I ne fournit pas directement un nombre de points de protection. Il indique comment l'eau s'infiltré et comment estimer le nombre total de points de protection. La figure 9 donne une vue d'ensemble des cas. Si l'infiltration est concentrée, la valeur de I est généralement nulle ou très faible et les paramètres E et P sont by-passés. Dans les autres cas, le paramètre I a uniquement pour rôle de modifier la valeur de la somme des paramètres E + P.

4.4 Paramètre P (couverture protectrice)

4.4.1 Principe

La couverture protectrice comprend l'ensemble des couches qui surmontent et protègent l'aquifère karstique :

- le sol pédologique ou « topsoil »,
- les dépôts meubles (moraine, colluvions, alluvions, etc.) ou « subsoil »,
- les roches cohérentes non karstifiées recouvrant l'aquifère karstique.

L'épaisseur des couches et leur nature (granulométrie, structure) déterminent le temps de transit, donc l'importance de l'effet protecteur. Au niveau des propriétés physiques, la conductivité hydraulique, la porosité efficace et la capacité de rétention en eau conditionnent notamment la capacité d'infiltration et la capacité de stockage d'eau et de polluants dans cette partie de la zone non saturée.

4.4.2 Méthode d'évaluation

Dans le cadre de l'évaluation et de la cartographie de l'effet protecteur de la couverture protectrice à l'échelle d'un bassin karstique, les deux critères qui peuvent être raisonnablement estimés sont l'épaisseur (e) et la conductivité hydraulique indicative (k) des couches.

Tableau 4

Paramètre P : points de protection de la couverture protectrice

Points de protection liés à la couverture protectrice (P). Les points de protection sont obtenus par l'addition de la classe estimée pour le sol et pour la couverture. En présence d'une couverture extrêmement perméable (éboulis, blocs non recouverts de sol), le nombre de points attribués pourrait être encore diminué (p. ex. max. 3 points au total).

	Épaisseur	Perméabilité			Remarques
		Élevée	Moyenne	Faible	
Sol pédologique (topsoil)	~0 m (discontinu ou absent)	0	0	0	Chemins préférentiels probables (terriers, racines, etc.), mais effet protecteur de la couche organique
	0,1 - 0,2 m (continu, peu épais)	0	1	1	
	0,2 - 0,5 m	1	2	2	
	0,5 - 1 m	1	4	5	
Subsoil (moraine, colluvions, roche non karstique, etc.)	0,5 - 1 m	1	2	5	Chemins préférentiels rares ou absents pour couverture non consolidée, mais plus probable pour roches cohérentes
	1 - 2 m	2	4	10	
	2 - 3 m	3	7	19	
	Pour chaque mètre supplémentaire	1 pt/m	3 pts/m	9 pts/m	

Le tableau 4 donne des valeurs indicatives des points de protection pour différents types de couvertures en fonction de leurs épaisseurs.

La conductivité hydraulique est estimée de manière très schématique en considérant trois classes :

- 1) Perméabilité très élevée : sols / terrains très aérés et/ou avec composants grossiers (graviers, sables), $K > 5 \cdot 10^{-4}$ m/s,
- 2) Perméabilité moyenne ou « normale » : sols organiques standard et/ou terrains avec composants mélangés, mais pas trop fins (pas d'argiles et peu de limons), $5 \cdot 10^{-4}$ m/s $> K > 5 \cdot 10^{-7}$ m/s,
- 3) Perméabilité très faible : sols / terrains avec composants fins (limons, argiles) et/ou tassés, $K < 5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

La caractérisation des épaisseurs et de la conductivité hydraulique indicative peut notamment être effectuée à l'aide des observations suivantes :

- Géomorphologie : observation de terrain et interprétation des géodonnées (modèle numérique de terrain (MNT), photos aériennes, cartes géologiques et pédologiques si disponibles)
- Sondages : tarière à main ou tarière moteur, fouilles, éventuels sondages existants
- Essai d'infiltration : trou de tarière, fouille, double anneau, arrosage
- Observations en conditions pluvieuses : appréciation de la capacité d'infiltration, tendance au ruissellement en fonction de l'intensité des précipitations
- Géophysique : sondages ou tomographie électrique

Pour la conductivité hydraulique, une valeur « moyenne » peut être admise par défaut. Les couvertures particulièrement perméables ($> 5 \cdot 10^{-4}$ m/s) correspondent par exemple à des éboulis non recouverts de sol, les couvertures à faible perméabilité ($< 5 \cdot 10^{-7}$ m/s) à des sols argileux ou des roches peu perméables. Il convient de relever ici que ce dernier type de couverture tendra à induire un écoulement superficiel et donc à créer des ruisseaux et des pertes.

Les points de protection associés aux différents types de couverture et épaisseurs sont indiqués au tableau 4. Le principe est, pour un point donné du bassin, d'identifier la classe pour le sol pédologique et la classe pour la couverture sous-jacente (subsoil et éventuellement roche consolidée non karstique). On additionnera ensuite les deux valeurs pour obtenir les points de protection associés à la couverture protectrice (P).

Pour les couvertures très perméables, la capacité de stockage et d'atténuation est très vite dépassée (fort taux d'infiltration en surface et renouvellement rapide de l'eau liés aux couches non saturées très perméables), particulièrement si le volume de liquide pollué est important. Si la couverture est très grossière (éboulis sans composante fine), des valeurs inférieures à celles du tableau 4 peuvent être admises.

Une procédure systématique a été mise au point pour cartographier les épaisseurs de couverture automatiquement à partir de données existantes (voir l'annexe 6). La résolution spatiale et la fiabilité de cette approche peuvent s'avérer insuffisantes dans certains cas.

4.5 Paramètre E (épikarst)

4.5.1 Principe

L'épikarst correspond à la roche calcaire présente dans les premiers mètres en dessous de la surface où les phénomènes d'altération, de décompression et de dissolution sont importants.

Au niveau géomorphologique, l'épikarst se manifeste localement en surface par des éléments typiques du paysage karstique (doline, dépression, lapiaz).

Du point de vue hydrogéologique, l'épikarst est une couche perméable capable d'absorber efficacement l'essentiel des précipitations. Il est drainé par des puits verticaux sous-jacents qui transmettent rapidement une partie des précipitations vers le réseau karstique et la source / le captage. Une autre partie de l'eau est stockée, parfois pour plusieurs semaines, dans les parties peu perméables et/ou mal drainées de l'épikarst.

L'épikarst permet donc à la fois à une partie des eaux d'infiltration de rejoindre rapidement le réseau karstique, et à une autre partie de rester stockée longtemps à proximité de la surface, permettant une certaine filtration. La capacité de stockage de l'eau est donc l'élément déterminant pour évaluer l'effet protecteur de l'épikarst. Elle dépend notablement de la lithologie des calcaires. Par exemple, un calcaire finement lité aura tendance à se déliter en petits blocs ou en cailloux, alors qu'un calcaire massif en banc épais présentera quelques fractures majeures, peu propices au stockage de l'eau. La porosité des calcaires accroît la gélivité des calcaires (susceptibilité à la gélifraction) et représente un élément important de l'altération en surface, particulièrement en moyenne et haute montagne. Les calcaires sparitiques, plus poreux, sont ainsi souvent plus gélifs que les calcaires micritiques.

La tectonique à l'échelle régionale (failles, plissements) influe également sur le développement de l'épikarst et son drainage en profondeur. Les failles et les décrochements principaux se traduisent généralement dans le paysage par des alignements de dolines et des zones particulièrement altérées.

La présence de remplissage / colmatage (loess, dépôts glaciaires, dépôts sidérolithiques) peut également conditionner le fonctionnement de l'épikarst en réduisant les écoulements vers les profondeurs.

4.5.2 Méthode d'évaluation

C'est sur la base de l'ensemble de critères géomorphologiques, lithologiques et géologiques que l'effet protecteur de l'épikarst peut être évalué et cartographié (tableau 5).

Bien souvent, l'épikarst est recouvert de sol qui rend peu ou pas visible l'existence d'un modelé karstique de la couche épikarstique.

Si la présence d'une morphologie associée à une forte karstification (gouffre, doline, dépression, lapiaz) suggère un drainage rapide des eaux météoriques vers la zone saturée et donc un faible degré de protection à l'épikarst, l'absence de morphologie karstique n'est pas suffisante à elle seule pour attribuer un effet protecteur important. C'est pourquoi un nombre de points différent peut être attribué à l'épikarst sur la base d'informations complémentaires (lithologie, contexte structural, essai d'infiltration, etc.).

Idéalement, le degré de protection attribué à l'épikarst devrait être justifié / validé par les résultats d'essais de traçage « normalisés » (annexe 8).

La qualité globale de l'évaluation de la fonction protectrice de l'épikarst dépend de la densité des essais de traçage correctement interprétables existant sur le bassin étudié ou dans un contexte hydrogéologique comparable.

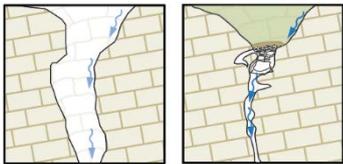
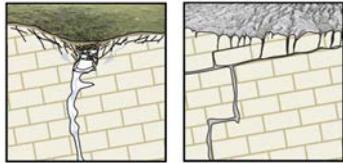
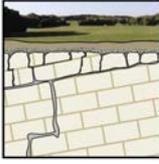
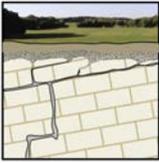
Dans certains cas où l'épikarst est invisible, c'est qu'il n'existe pas ! C'est-à-dire que la roche ne présente pas une surface altérée et que seules de rares fissures peuvent guider l'eau en profondeur. C'est par exemple le cas d'un calcaire récemment décapé par un glacier. Si le calcaire est couvert de terrain meuble, alors l'eau devra cheminer non seulement verticalement à travers la couverture, mais aussi horizontalement dans le terrain vers les fissures. Le temps de séjour y sera alors élevé.

La cartographie géomorphologique peut s'effectuer grâce à l'étude des MNT, de photographies aériennes et de cartes géologiques, ainsi que par des relevés de terrain spécifiques.

Tableau 5

Points de protection correspondant à différents types d'épikarst

Les valeurs d'atténuation indiquées se réfèrent à l'atténuation liée au paramètre K. Si des données de traçage sont disponibles, la mesure du traceur étant généralement faite à la source ou au captage, l'atténuation observée sera plus importante (l'atténuation liée au sol et au réseau karstique y sera ajoutée).

Morphologie	Illustration (exemple)	Description	Rétention	Atténuation (essai de traçage)	Points de protection
Gouffre, perte	 Gouffre Perte	Point connecté directement au réseau karstique	Nulle	0 à 20 % Restitution traceur > 80 %	0
Doline, lapiaz	 Doline Lapiaz	Couche altérée, drainée rapidement vers le réseau karstique	Faible	20 à 50 % Restitution traceur 50 à 80 %	1
Invisible		Couche altérée avec capacité de stockage, mais drainée efficacement par le réseau karstique	Moyenne	50 à 80 % Restitution traceur 20 à 50 %	3 à 6
Invisible		Absence d'épikarst ou de couche altérée, faible drainage vers le réseau karstique	Élevée	> 80 % Restitution traceur < 20 %	6 à 9

4.6 Paramètre K (conduits karstiques)

4.6.1 Principe

Le transfert de l'eau entre la zone proche de la surface (sol et épikarst) et l'exutoire du système (source karstique dans une situation naturelle) se fait au travers d'un réseau de conduits qui se sont développés naturellement pour drainer efficacement les eaux vers l'exutoire. L'écoulement est principalement vertical dans la zone non saturée. Dans la zone noyée, il est horizontal et principalement orienté en direction de l'exutoire. Dans la pratique, l'eau de la zone non saturée peut soit atteindre directement la zone noyée (partie gauche de la figure 2), soit atteindre la base de la couche aquifère et suivre, sous la forme d'une « rivière souterraine » le toit imperméable jusqu'à la zone saturée. Dans les deux cas, la filtration de l'eau pendant son trajet dans le réseau karstique est limitée. En revanche, le nuage d'une pollution localisée spatialement sera dilué par des eaux provenant de l'ensemble du bassin d'alimentation.

4.6.2 Méthode d'évaluation

Globalement, le cheminement souterrain apporte une légère filtration / dilution impliquant de donner **par défaut 1 point de protection lié au réseau karstique (K)**. Seuls des systèmes très particuliers (p. ex. source alimentée essentiellement par une seule perte peu distante) pourraient justifier de ne mettre aucun point de protection au réseau karstique.

Dans la zone non saturée, on admettra simplement *1 point* de protection supplémentaire pour 300 mètres d'épaisseur pour une zone alimentée par des infiltrations diffuses, donc probablement temporaires (voir le tableau 6). La protection diminue notablement si la recharge se fait via une perte pérenne. Pour une perte concentrée, on comptera plutôt 1 point pour 1000 mètres d'épaisseur.

Dans une « rivière souterraine », la vitesse est généralement de l'ordre de 100 m/h en basses eaux et de 300 m/h en hautes eaux. Sans données spécifiques (traçage), on admettra *1 point* de protection pour 5 km de distance à vol d'oiseau.

Dans la zone noyée, l'eau s'écoule généralement à une vitesse modérée en basses eaux (1 à 50 m/h), mais peut facilement atteindre 200 m/h, voire plus de 500 m/h en hautes eaux. Sans données spécifiques (traçage), on admettra *1 point* de protection pour 2,5 km de distance à vol d'oiseau.

Si des données de vitesses sont disponibles, on donnera *1 point* de protection par deux jours de temps de passage, ceci pour les conditions qu'on estimera les plus sensées par rapport aux dangers de pollution que l'on pourra supposer dans le bassin. Vu les gammes de vitesses observées (extrêmes situés entre 1 et 1000 m/h) et leur variabilité en fonction des conditions hydrologiques, le bon sens de l'hydrogéologue qui connaît le terrain doit intervenir dans l'évaluation.

Dans le cas où le système karstique alimente directement un aquifère non karstique, des phénomènes de filtration et d'atténuation plus efficaces sont attendus (tableau 4).

Figure 8**Transfert de l'eau dans les zones non saturée et phréatique.**

Une rivière souterraine (écoulement libre) se forme si le toit imperméable à la base de la couche calcaire est situé plus haut que la source karstique (à droite sur la figure). Sinon, l'eau arrive directement dans la zone saturée (à gauche sur la figure).

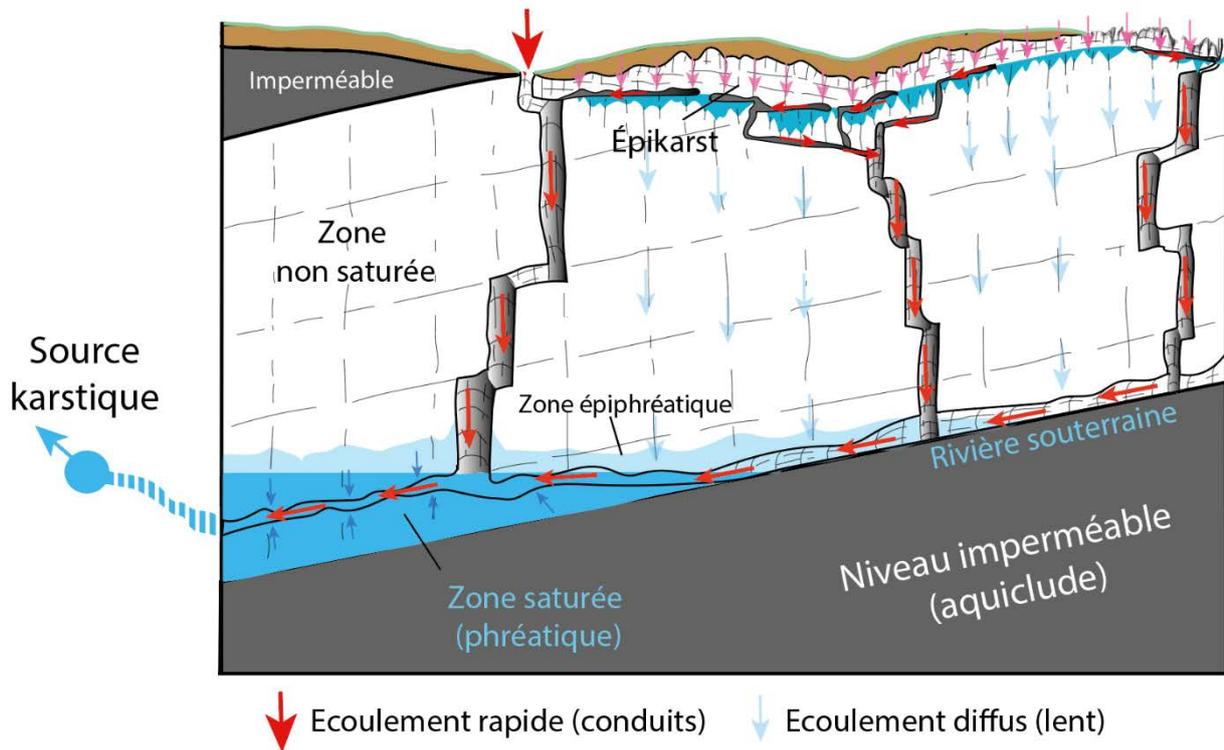


Tableau 6

Par défaut, on attribuera 1 point de protection au réseau karstique (paramètre K).

Le tableau ci-dessous donne les valeurs indicatives des points supplémentaires qu'il convient d'ajouter.

Zone	Illustration (exemple)	Description	Rétention	Points de protection
Zone non saturée sous perte		Puits alimentés par une perte pérenne	Faible Spray et contact élevé avec les parois des puits	1 pt pour 1000 m
Zone non saturée (inf. diffuse)		Puits alimentés par les infiltrations diffuses (± secs en basses eaux)	Moyenne Spray et contact élevé avec les parois des puits, bassins secs à remplir	1 pt pour 300 m
Rivière souterraine		Rivière en écoulement libre (vitesses rarement inférieures à 50 m/h)	Très faible Écoulement rapide, surface de contact limitée	1 pt pour 5000 m
Zone noyée		Conduits noyés avec vitesses faibles en basses eaux (grande section d'écoulement par rapport au débit)	Faible Écoulement à vitesse modérée, surface de contact moyenne	1 pt pour 2500 m

4.7 Combinaison des paramètres et cartes de vulnérabilité

La carte de vulnérabilité (ou plutôt de protection) est obtenue en additionnant les points de protection obtenus pour chacun des paramètres.

La combinaison des paramètres inclut les étapes suivantes (figure 9) :

- 1) Identification des pertes et des zones de recharge semi-concentrée, définition de leurs bassins versants
- 2) Cartographie du paramètre I dans les bassins versants déterminés au point 1
- 3) Pour toutes les zones d'infiltration diffuse et semi-diffuse, cartographie des paramètres E et P :
 - a. pour les zones d'infiltration diffuse, addition des valeurs E et P
 - b. pour les zones d'infiltration semi-diffuse, la valeur de l'addition des paramètres E et P est divisée par deux
- 4) Cartographie du paramètre K
- 5) Addition des valeurs I ou E + P au paramètre K, pour chaque zone du bassin d'alimentation : la carte des facteurs de protection (ou carte de vulnérabilité) ainsi obtenue tient compte du cheminement de l'eau depuis son infiltration dans le sol jusqu'au captage

Si l'infiltration est concentrée, la valeur de I est généralement nulle ou très faible et les paramètres E et P sont by-passés. Dans les autres cas, le paramètre I a uniquement pour rôle de modifier la valeur de la somme des paramètres E + P. Les exemples suivants illustrent cette manière de faire :

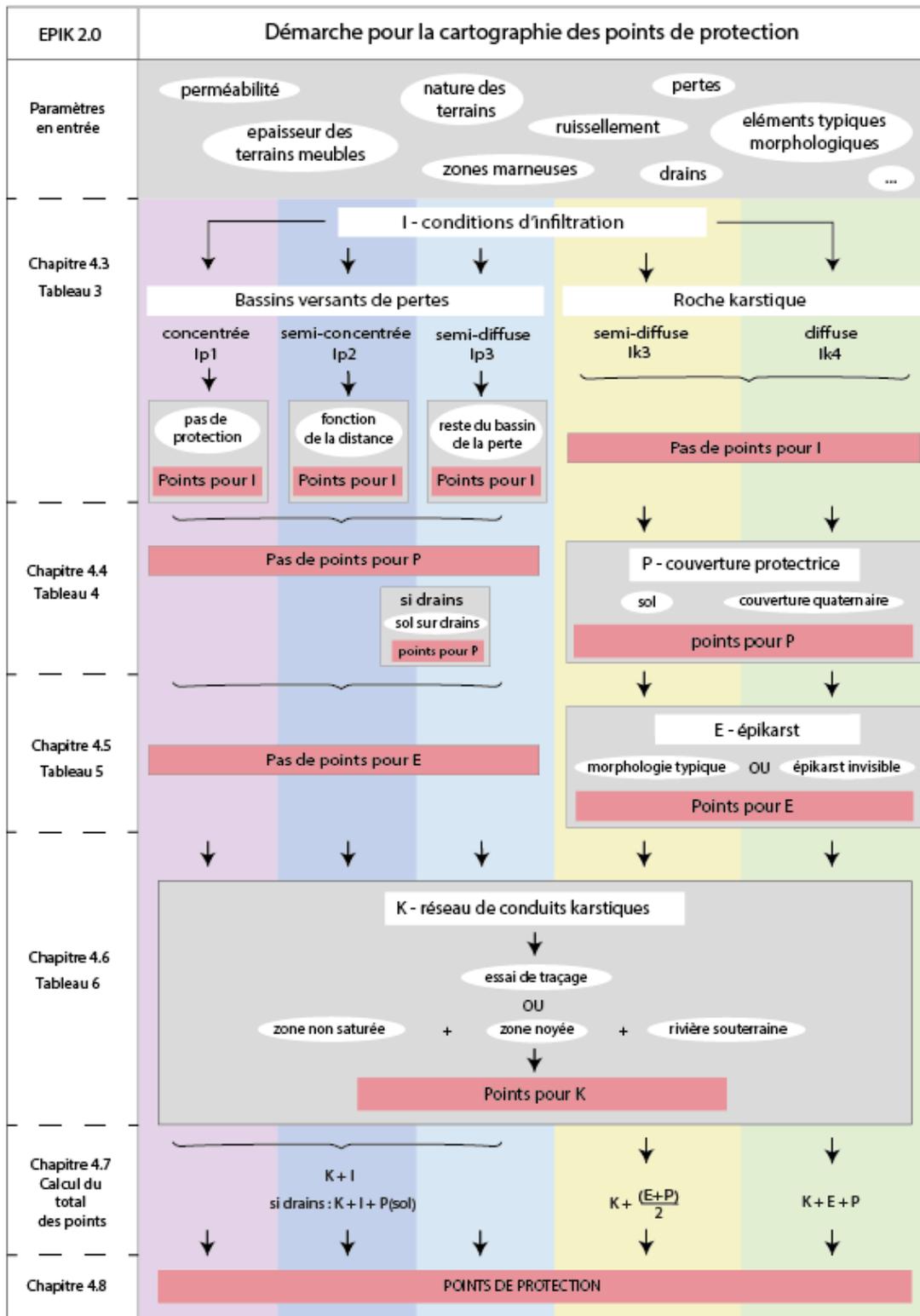
- pour une perte, on obtient 0 point pour I et 1 point pour K ;
- pour un lapiaz peu couvert, la somme atteindra environ 3 points (1 point pour K, 1 point pour E et 1 point pour P) ;
- dans le cas d'une zone bien couverte d'un grand bassin karstique (avec dilution), il n'est pas exclu d'atteindre 20 points ou plus (p. ex. 5 points pour K, 6 points pour E et 10 points pour P).

De manière générale, la somme des points de protection sera comprise entre 2 et 20 points. Les situations conduisant à plus de 20 points de protection sont toutefois relativement rares.

Relevons que, dans l'application de la méthode, une certaine marge de manœuvre est laissée à l'interprétation de l'hydrogéologue, qui connaît le terrain et les enjeux. Cette marge concerne tous les paramètres, mais le paramètre E est peut-être celui où elle est la plus importante. Ce qui doit prévaloir lors de l'application est de bien évaluer l'atténuation de chacun des sous-systèmes effectivement traversés par l'eau et un éventuel polluant qu'elle contiendrait.

Figure 9

Aperçu de la démarche pour évaluer les points de protection à partir de la cartographie des points de protection des paramètres E, P, I et K. Dans la pratique, il est logique de commencer par évaluer le paramètre I, puis P et E, et enfin K.



4.8 Transformation en zones de protection S et secteurs de protection

Conformément à l'ordonnance fédérale et à son annexe 4, la zone S1 est délimitée par un secteur de 10 mètres autour du captage et éventuellement par les pertes où existe une menace pour l'utilisation de l'eau potable, et leur environnement immédiat. Concernant la zone S2, elle est en principe délimitée par la zone située 100 mètres en amont de la zone S1 liée directement au captage (pas aux pertes).

Au-delà de la zone S2, le tableau 7 donne la clé de conversion des valeurs de la carte de vulnérabilité (points de protection) en zones de protection Sh, Sm et secteurs de protection Au / Ao.

Tableau 7

Conversion des points de protection en zones et secteurs de protection des eaux d'un captage

Points de protection	Protection	Vulnérabilité	Zones S / Secteurs Au / Ao
0 à 1	Très faible	Vulnérabilité élevée	Sh
2 à 5	Faible		
6 à 9	Faible à modérée	Vulnérabilité moyenne	Sm
10 à 12	Modérée		
12 à 15	Modérée à forte		
> 15	Élevée	Vulnérabilité faible	Au / Ao

5 Conclusion

Le présent guide pratique décrit les principes généraux de l'évaluation de la vulnérabilité (protection) des eaux en milieu fortement hétérogène (karstique ou similaire). La méthode est basée sur l'évaluation, pour un point d'un bassin d'alimentation d'un captage, des sous-systèmes qui seront traversés par un polluant éventuel et du temps de séjour dans chacun d'eux. Différentes données sont ainsi combinées selon une série de critères pour évaluer le temps de séjour (ou points de protection).

Pour une application aussi transparente et reproductible que possible, des données de base, couvrant le territoire, sont utilisées et combinées dans un système SIG. Toutefois, les données disponibles n'étant jamais parfaites, l'hydrogéologue ayant une bonne connaissance du karst et de la région étudiée validera et ajustera le cas échéant certaines données pour aboutir à un résultat fiable et crédible. Pour garder une certaine transparence dans l'application de la méthode, il est vivement recommandé de créer des couches SIG correspondant aux corrections introduites par l'hydrogéologue et de documenter les corrections introduites. Constatant l'arrivée régulière de données nouvelles et plus précises, il est important de savoir exactement ce qui a été ajusté et pour quelles raisons.

Cette façon de faire laisse donc une marge de manœuvre à l'hydrogéologue et aux services cantonaux responsables pour ajuster les délimitations des zones de protection à la situation qui leur semble la plus réaliste et applicable, tout en restant transparents.

L'évaluation des zones de protection selon l'approche décrite dans le présent guide se fait en principe indépendamment de la carte des menaces de pollution, qui complétera le dossier des zones de protection des eaux souterraines en milieu fortement hétérogène.

6 Bibliographie

- Brouyères, S., Jeannin, P.Y., Dassargues, A., Goldscheider, N., Popescu, I.C., Sauter, M., Vadillo, I., Zwalhen, F., 2001. Evaluation and validation of vulnerability concepts using a physically based approach, in: Proceedings of the 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besançon, sept. 2001. pp. 67–72.
- Filipponi, M., Schmassmann, S., Jeannin, P.Y., Parriaux, A., 2012. KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau. Bundesamt für Strassen ASTRA / Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich, Schweiz.
- Hamedinger, T., 2019. Kartierung der Rückhaltezeit von Schadstoffen im bedeckten Karst (MSc thesis). Universität für Bodenkultur Wien, Department für Bautechnik und Naturgefahren.
- Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. & Dreybrodt W. (editors), 2000: Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, NSS publisher: 527 p.
- OFEV, 2022. Protection des eaux souterraines : aquifères karstiques et fissurés fortement hétérogènes. Un module de l'aide à l'exécution Protection des eaux souterraines (n° 2223), L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Doerfliger, N., Zwalhen, F., 1998. Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). Guide pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Berne, Suisse. Gilbrich, W.H., Zaporozec, A., 1994. Introduction, in: Vrba J. & Zaporozec A. (1994): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, IAH, International Contributions to Hydrogeology. Hannover, pp. 1–2.
- Jeannin, P.Y., Cornaton, F., Zwalhen, F., Perrochet, P., 2001. Vulk: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation, in: Proceedings of the 7th Conference on Limestone Hydrogeology and Fissured Media, 20-22 sept. 2001. pp. 185–190.
- Pochon, A., Zwalhen, F., 2003. Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré (guide pratique). OFEFP/OFEG, Berne.
- Sinreich, M., Pochon, A., 2015. Standardized Approach for Conducting Tracing Tests in Order to Validate and Refine Vulnerability Mapping Criteria, in: Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P., LaMoreaux, J.W. (Eds.), Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 131–137. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17435-3_15
- Ford, D., Williams, P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. Wiley.
- Johnson, S.B., Stieglitz, R.D., 1990. Karst features of a glaciated dolomite peninsula, Door County, Wisconsin. *Geomorphology* 4, 37–54.
- Gilli E. 1995. La spéléologie. Que sais-je ?, Presses universitaires de France.
- Rodet J. 1992. La craie et ses karsts. Centre de géomorphologie du CNRS, 1ière édition. 1992.
- Masson H. 1972. Sur l'origine de la cornieule par fracturation hydraulique. *Eclogae geol. Helv.*, vol. 65/1 : 27-41.
- Debelmas J., Gidon M., Kerchkove C., 1976. Idées actuelles sur les cagneules alpines. *Doc. lab. Geol. Fac. Sci. Lyon*, HS4, 195-201.
- Furrer, H. (Ed.) 1985: Field workshop on Triassic and Jurassic sediments in the Eastern Alps of Switzerland. *Mitt. Geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich (N.F.)* 248, 1-81.
- Frank, M. 1986. Die Raibl-Gruppe und ihr Liegendes im Oberostalpin Graubündens. *Mitteilungen aus dem Geologischen Institut der Eidg. technischen Hochschule und Universität Zürich N.F.* 269, 1–239.
- Frumkin A. 2000. Dissolution of Salt. In: Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. & Dreybrodt W. (editors): Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, NSS publisher: 169-170.

Bases légales

LEaux, 1991 : Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) du 24 janvier 1991. L'Assemblée fédérale de la Confédération suisse.

OEaux, 1998 : Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998. Le Conseil fédéral suisse.

OFEFP, 2004 : Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 141 p.

OFEV (éd.), 2022 : Protection des eaux souterraines, aquifères karstiques et fissurés fortement hétérogènes. Un module de l'aide à l'exécution Protection des eaux souterraines. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 2223 : 50 p.

7 Annexes

A1 Caractéristiques de la karstification des principales formations géologiques karstifiables de Suisse et applicabilité de la méthode EPIK 2.0

Le présent tableau est adapté de Filipponi et al. (2012). Les autres formations géologiques sont considérées comme non karstifiables.

Légende :

0 = très faible 1 = faible; 2 = moyen 3 = élevé

Lithologie (Formation)	Potentiel de karstification	Solubilité	Caractéristiques de la karstification	Remarque pour l'application de EPIK 2.0	Applicabilité EPIK	Littérature
Calcaire	3	2	Formes karstiques classiques, systèmes karstiques étendus, souvent multiphasés.	Domaine d'application principal de la méthode EPIK 2.0.	3	Filipponi et al. (2012), Ford & Williams (2007)
Dolomie	2	2	Karstification plus lente et plus restreinte que dans le calcaire ; pour les formations peu épaisses, la karstification dépend du potentiel de karstification plus ou moins élevé des roches voisines.	Dans les séries dolomitiques épaisses et homogènes, la méthode est en principe utilisable. C'est aussi le cas si des bancs dolomitiques se trouvent au sein de formations peu karstifiables.	2	Johnson (1990)
Marnes	1	1	Les bancs calcaires des séries marneuses sont souvent karstifiés, mais pas les bancs argileux. La karstification traverse donc rarement toute la série marneuse.	Le potentiel de karstification des marnes est souvent sous-estimé. L'application de EPIK 2.0 est recommandée dans certains cas, sinon plutôt la méthode DISCO.	1	Gilli (1995)
Calcschistes	2	1	Le potentiel de karstification est très variable. Il dépend fortement de la proportion de calcite dans les schistes. En présence de teneur élevée, la karstification peut se développer, même si les formes de surface sont peu visibles en raison de la faiblesse mécanique de la roche.	L'application de EPIK 2.0 dépend fortement du taux de calcite dans la roche. L'application de EPIK 2.0 est recommandée dans certains cas, sinon plutôt la méthode DISCO.	1	
Marbre	3	2	Les marbres sont des calcaires et se karstifient comme tels. Dans le cas de minces bancs de marbres dans des formations peu karstifiables (p. ex. gneiss), la karstification se développe presque en 2D en suivant le banc de marbre.	La méthode EPIK 2.0 doit être appliquée.	3	
Brèches et conglomérats calcaires (y. c. Jura-Nagelfluh)	1	2	Souvent, la karstification peut se développer, mais de manière limitée en raison de la faible stabilité de la roche. On y trouve toutefois parfois des cavités assez stables (y. c. dans le Nagelfluh et les gompholites).	L'application de EPIK 2.0 est recommandée dans certains cas, sinon plutôt la méthode DISCO.	2	
Craie	2	2	En raison de la porosité élevée et de l'homogénéité, les cavités sont plutôt rares dans la craie. En Suisse, les formations crayeuses sont rares et souvent situées au sein de formations calcaires karstifiées.	Les craies lacustres connues en Suisse (p. ex. craie du Locle) ne sont que partiellement karstifiées. La méthode EPIK 2.0 n'est en principe pas appliquée.	1	Rodet (1992)

Grès (à ciment calcaire)	2	1	Les grès à ciment calcaire peuvent être notablement karstifiés, particulièrement s'ils sont assez compacts. Leur karstification est souvent sous-estimée.	L'application de EPIK 2.0 est recommandée dans certains cas, sinon plutôt la méthode DISCO.	2	
Cornieule (Rauhacke)	2	2	La présence de gypse dans les masses hétérogènes de cornieules peut créer une karstification et des instabilités locales, mais parfois régionales.	L'application de EPIK 2.0 est recommandée dans certains cas, sinon plutôt la méthode DISCO.	2	Masson (1972) ; Debelmas et al. (1976); Furrer et al. (1985) ; Frank (1986)
Gypse & anhydrite	3	3	L'anhydrite est en général peu karstifiée, mais le gypse l'est fortement. La karstification y est rapide et plutôt peu profonde (quelques dizaines de mètres).	En raison des fortes teneurs en sulfates, les eaux issues du gypse ne sont pas utilisées pour l'eau potable.	0	Klimchouk (2000)
Halite (sel)	3	3	Les affleurements sont très rares en raison de la rapidité de la dissolution. La karstification y est très rapide à partir du moment où de l'eau non saturée circule sur la formation salée.	En raison des fortes teneurs en chlorure de sodium, les eaux issues du sel ne sont pas utilisées pour l'eau potable.	0	Frumkin (2000)

A2 Délimitation du bassin d'alimentation d'une source ou d'un captage en milieu karstique

La délimitation du bassin d'alimentation des captages à protéger est indispensable pour déterminer l'extension de la zone à cartographier, et assurer la protection de la totalité de la ressource exploitée.

Un modèle conceptuel des écoulements souterrains doit être établi pour comprendre / expliquer comment circulent les eaux. Il synthétise les données existantes, décrit les différentes zones d'écoulement et indique quel est le bassin d'alimentation. Ce modèle doit décrire explicitement comment l'hydrogéologue ayant une bonne connaissance du terrain évalue, en chaque point de l'espace, comment les eaux circulent entre leur zone d'infiltration et le(s) captage(s) à protéger.

A2-1 Marche à suivre

Six étapes principales sont nécessaires pour établir un tel modèle.

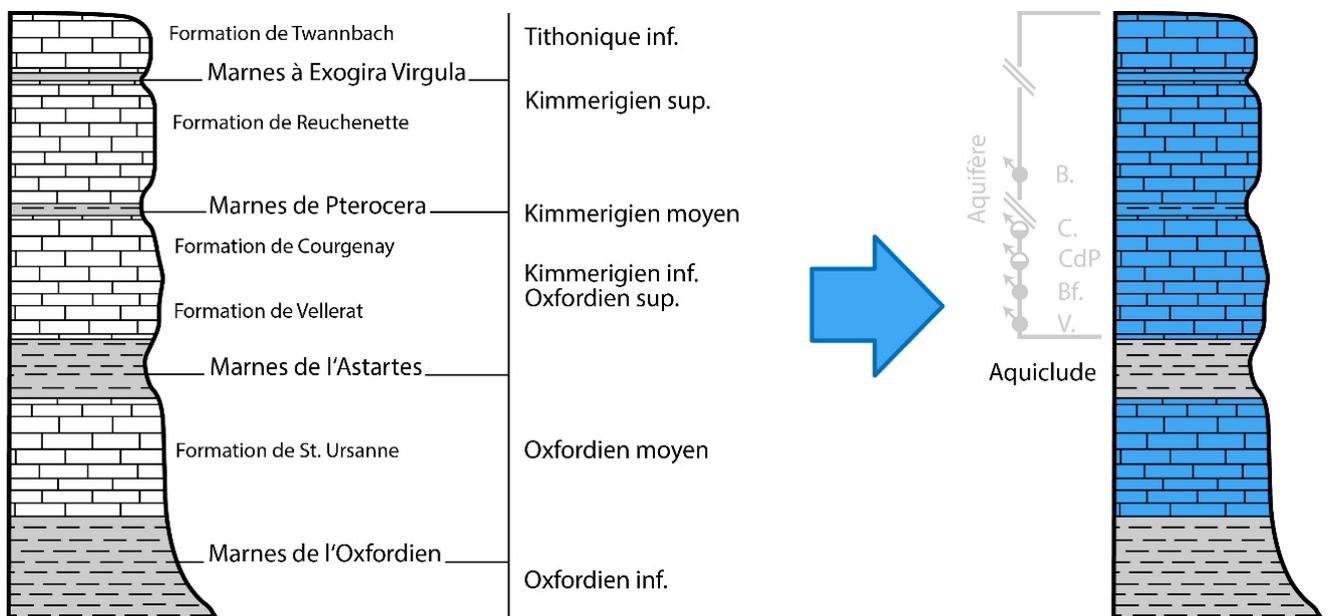
1) Passer des descriptions lithologiques à des unités hydrostratigraphiques

Sur la base des coupes lithologiques existantes (notice des feuilles de l'atlas géologique, travaux de thèse, articles, études régionales), on identifiera les couches géologiques potentiellement karstifiées (ou du moins perméables) qui peuvent être considérées comme aquifères. Les couches imperméables sont aussi importantes, car elles délimitent la géométrie des nappes d'eaux souterraines. Les faciès pouvant varier notablement d'une région à l'autre, il est souvent conseillé de valider les hypothèses formulées à partir de la documentation par des vérifications sur le terrain.

Figure 10

Exemple de transformation d'une description lithostratigraphique en un profil hydrostratigraphique

(aquifères en bleu, aquicludes en gris)



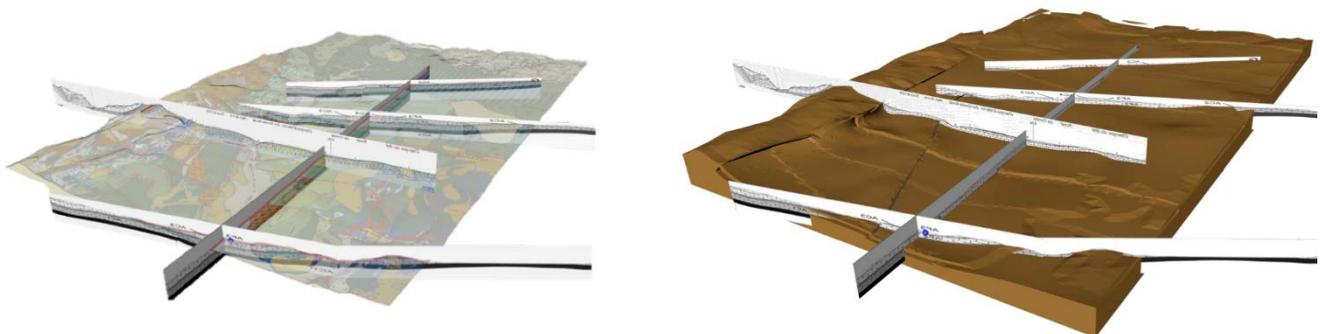
2) Créer un modèle géologique pour définir la géométrie des couches aquifères

L'eau s'écoule en trois dimensions au travers des couches aquifères, depuis les zones d'infiltration vers les zones d'exutoires. Il importe donc autant que possible de se représenter la géométrie des couches aquifères. La carte géologique et les profils géologiques sont les données les plus souvent utilisables. Pour une étude détaillée, on partira des données de l'atlas géologique auxquelles on ajoutera les données issues d'études locales de la géologie, d'études géophysiques et des données de forages. Dans les cas où la structure géologique est simple, la compilation pourra se faire à la main ou préférablement dans un SIG. On établira grossièrement une carte d'isohypses de la base de l'aquifère. Dans le cas de structures plus complexes, il sera plus simple d'utiliser un modeleur géologique 3D pour bien comprendre les structures.

Figure 11

À gauche, carte géologique et profils géologiques placés dans une scène en trois dimensions.

À droite, géométrie de la couche imperméable formant la base de la couche aquifère, interpolée à partir des données géologiques disponibles.

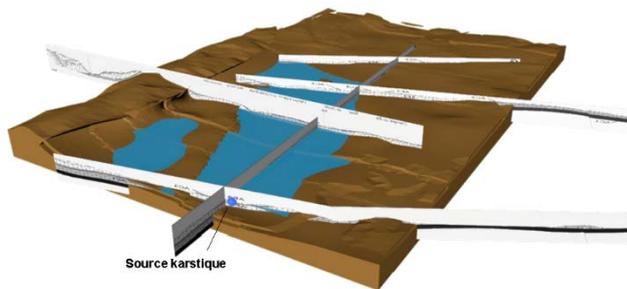


3) Délimitation des zones noyées

Au-dessous du niveau des exutoires, la couche aquifère est certainement noyée. Par conséquent, le volume d'aquifère situé sous le niveau des sources (ou captages) représente la zone noyée. Ainsi, la géométrie de la zone noyée peut être dessinée sur la carte d'isohypses en admettant, par défaut, que les gradients sont proches de zéro (nappe horizontale). Toutefois, si des données de charges hydrauliques sont disponibles, on peut envisager de donner une certaine pente à la nappe.

Parallèlement, il est vivement conseillé de dessiner les nappes d'eaux souterraines sur les profils géologiques, ce qui permet une représentation plus explicite des écoulements.

Dans les géométries complexes, on utilisera un modèle 3D qui permettra de visualiser directement l'extension de la nappe, ainsi que les zones de nappe libre et de nappe captive. On pourra aussi identifier les relations potentielles entre différents compartiments ou couches aquifères mis en contact par l'intermédiaire de failles.

Figure 12**Extension de la nappe d'eau souterraine extrapolée à partir de la source au travers du modèle géologique en 3D**

4) Esquisse du système d'écoulement et du bassin d'alimentation

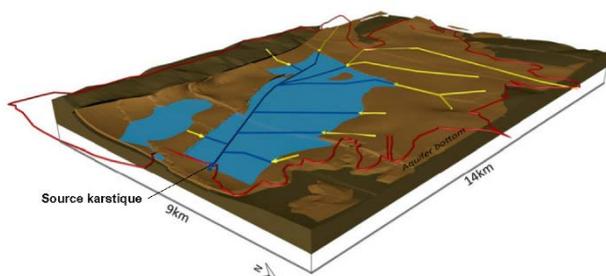
De manière générale, depuis la zone de recharge, l'eau s'écoule verticalement dans la zone non saturée jusqu'à atteindre la zone noyée ou la base imperméable de l'aquifère. Dans ce dernier cas, l'eau suivra le plongement des couches en direction de la zone noyée. En fonction des surfaces de recharge et de la présence de pertes, il est possible d'esquisser les axes principaux de drainage de la zone non saturée, et d'identifier les points où l'eau atteint la nappe. Depuis ces points, l'eau s'écoule vers la source selon le chemin de plus faible résistance hydraulique, c'est-à-dire soit par le chemin le plus court, soit en suivant les structures particulièrement perméables (p. ex. des failles). Il est ainsi possible d'esquisser le chemin de l'eau et donc de savoir d'où provient l'eau d'une source ou d'un captage.

Remarque : il est souvent difficile de délimiter les zones d'alimentation de sources et de captages lorsque plusieurs exutoires sont situés dans une même zone noyée. Les limites doivent être fixées sur la base de principes hydrauliques, en tenant compte de l'altitude des différents exutoires et de leurs débits respectifs.

Les étapes 1) à 4) peuvent être réalisées de manière très grossière en lisant la carte géologique et les profils, ou avec plus de précision en construisant une carte d'isohypses. L'outil Visual KARSYS, librement accessible, a été conçu pour appliquer ces étapes explicitement et en 3D.

Figure 13

Axes de drainage principaux (en jaune = non saturés, en bleu = noyés) et bassin d'alimentation de la source



5) Vérification par le bilan hydrologique

De manière générale, le débit des exutoires est proportionnel à la surface qui alimente l'aquifère karstique. Il importe donc d'identifier l'ensemble des exutoires d'un système aquifère et d'évaluer leurs débits. Pour une vérification grossière, on se contentera d'ordres de grandeur (10, 100, 1000, 10 000 l/s).

En Suisse, le débit moyen des sources dépend d'une part de la surface du bassin d'alimentation, d'autre part de la fréquence et de l'intensité des précipitations, qui sont elles-mêmes fortement conditionnées par l'altitude.

Le débit spécifique moyen des sources (débit moyen par km² de bassin d'alimentation) dépend donc globalement de l'altitude du bassin. Le tableau 8 donne les ordres de grandeur des débits spécifiques moyens en fonction de l'altitude.

Tableau 8

Ordres de grandeur des débits spécifiques moyens pour différentes classes d'altitudes (valeurs pour la Suisse)

Altitude [MSL]	500-800	800-1100	1100-1400	1400-1700	1700-2000	>2000
Débit spécifique moyen	15-30 [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]	20-40 [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]	30-60 [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]	40-80 [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]	50-100 [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]	70-140 [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]

Dans le bilan, on tiendra compte des surfaces karstiques éventuellement drainées vers d'autres exutoires et, inversement, des surfaces non karstiques alimentant le karst (p. ex. un synclinal tertiaire avec des rivières se perdant dans le karst). Les « cartes du karst » réalisées dans certains cantons apportent des informations utiles à ce sujet.

Pour une délimitation précise des surfaces des bassins d'alimentation, il conviendra de disposer de mesures de débits aux différents exutoires et d'établir un calcul de bilan hydrique en bonne et due forme.

Lorsque plusieurs exutoires drainent une même nappe, il peut être difficile de délimiter clairement le bassin de chaque source ou captage. Des principes hydrauliques tenant compte de l'altitude des différents exutoires et de leurs débits respectifs doivent être appliqués. Des modèles d'écoulement peuvent aussi s'avérer utiles, mais une approche qualitative est souvent suffisante.

6) Vérification du bassin d'alimentation par les essais de traçage

On pourra valider le modèle établi au cours des étapes précédentes en injectant des traceurs aux alentours des limites supposées du bassin d'alimentation. Il convient au préalable de synthétiser les données d'essais de traçage existants et d'évaluer la fiabilité de ceux-ci, certains essais ayant parfois été réalisés de façon peu rigoureuse.

Ces six étapes doivent permettre d'aboutir à un modèle cohérent mettant en relation les zones de recharge d'un massif karstique aux exutoires. Le captage sera ainsi placé dans son contexte hydrogéologique, et le bassin d'alimentation ainsi défini devrait s'approcher du bassin réel alimentant le captage.

Références clés

Jeannin P.-Y.; Eichenberger U.; Sinreich M.; Vouillamoz J.; Malard A.; Weber E., 2013. KARSYS, a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Application to the assessment of reserve and resource estimation of groundwater in Switzerland. – *J. of Environmental Earth Sciences*, 69(3): 999-1013. DOI 10.1007/s12665-012-1983-6.

Malard A., Jeannin P.-Y., Vouillamoz J., Weber E., 2015. An integrated approach for catchment delineation and conduit-network modeling in karst aquifers: application to a site in the Swiss tabular Jura. – *Hydrogeology Journal* 23(7): 1341 57.

Malard A., Sinreich M., Jeannin P.-Y., 2016. A novel approach for estimating karst groundwater recharge in mountainous regions and its application in Switzerland. – *Hydrological Processes* 30(13): 2153 66.

Malard A., 2018. Hydrogeological characterization of karst aquifers in Switzerland using a pragmatic approach. – PhD-Thesis, Université de Neuchâtel, 2018.

A3 Caractérisation des paramètres quantitatifs et qualitatifs de l'eau (monitoring)

A3-1 Paramètres à monitorer

Les paramètres suivants sont les plus usuels :

- **Débit** : pour le captage à protéger, mais aussi pour l'ensemble des zones d'exutoire du bassin (sources pérennes et trop-pleins). Des jaugeages ponctuels, voire l'établissement de courbes de tarage peuvent s'avérer nécessaires.
- **Conductivité électrique** : la variabilité de ce paramètre lors des crues peut permettre d'évaluer de manière indicative l'infiltration rapide d'eau peu minéralisée (eau d'une perte ou du sol). Attention : la conductivité électrique varie notablement en fonction de l'altitude à laquelle les eaux s'infiltrent (600 à 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en plaine, 300 à 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre 1000 et 1500 m, 100 à 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au-dessus de 2000 m). C'est en effet la pression partielle de CO_2 dans les sols du bassin d'alimentation des sources qui fixe la quantité de calcaire que l'eau pourra dissoudre le long de son cheminement souterrain.
- **Température** : de fortes variations de température peuvent témoigner de la prépondérance de contribution d'eau de surface (pertes).
- **Turbidité** : ce paramètre peut traduire la remobilisation de particules préalablement déposées dans la zone noyée / épinoyée (turbidité autochtone), ou l'arrivée d'eaux troubles depuis la surface (pertes, turbidité allochtone). Dans le deuxième cas, le pic est souvent associé à la présence de bactéries.

Si possible :

- **Fluorescence UV** : cette mesure permet de suivre les variations de matière organique en continu (COT). Comme pour la turbidité allochtone et les bactéries, ce paramètre peut indiquer des infiltrations rapides depuis des pertes.

Il est conseillé de mesurer ces paramètres « en continu » (p. ex. toutes les 30 min) sur au moins un cycle hydrologique. Il est au minimum important de disposer de données de basses et de hautes eaux.

La mesure de ces paramètres permet d'évaluer de manière globale le comportement et la vulnérabilité globale du système.

Au minimum, une évaluation (identification, estimation du débit, mesure de la température et conductivité électrique) de la totalité des exutoires du système en hautes eaux (exutoires pérennes et trop-pleins) est indispensable. Sur cette base, une mesure en continu du niveau d'eau, de la conductivité électrique et de la température aux exutoires les plus caractéristiques est nécessaire pour évaluer la variabilité du comportement du système. Une variabilité importante est un signe de karstification probable, mais certains systèmes peuvent être karstifiés et présenter une variabilité modérée ou même faible.

A3-2 Campagnes d'échantillonnage

Au cas où le suivi en continu s'avère impossible ou très limité, l'échantillonnage manuel des exutoires du système pour évaluer la qualité des eaux devrait être répété de manière à bien couvrir la gamme de variations des conditions hydrologiques. Dix à vingt tournées d'observation et d'échantillonnage sont alors nécessaires. Dans la mesure du possible, on en profitera pour mesurer également l'oxygène dissous (particulièrement important pour les forages et aquifères plus profonds de type dogger) et le pH.

Un certain nombre de tournées d'échantillonnage sera nécessaire pour effectuer des analyses standard de qualité des eaux requises pour un captage d'eau potable : ions majeurs, germes totaux, *E. Coli*, entérocoques, produits phytosanitaires, hydrocarbures.

Des analyses complémentaires doivent être faites de manière plus ciblée.

A3-3 Exemple d'interprétation de données issues de trois stations OFEV monitorant des sources karstiques

Débit

Les stations Boncourt-Milandre amont (MIL) et Brot-Dessous-Bossy (BOS) présentent un régime pluvial avec des crues en hiver et un étiage en été. La station Muotathal-Schlichenden-Brünnen (SB) présente un régime essentiellement nival, avec un étiage en hiver et des hautes eaux à la fonte des neiges entre avril et août. Le bassin d'alimentation des sources MIL et BOS se situe certainement au-dessous de 1000 mètres d'altitude, alors que celui de SB doit s'étendre au moins partiellement au-dessus de 2000 mètres.

Les pics de crue de MIL et SB (hors période de neige) sont étroits et élevés, la source est donc bien connectée au réseau karstique qui draine le massif. Les pics de crue de BOS sont de plus faible intensité et plus larges. Le captage est mal connecté au réseau karstique, ce qui traduit le fait que BOS est en fait l'exutoire d'une galerie artificielle de captage qui recoupe non seulement des calcaires, mais aussi l'aquifère d'un cordon morainique.

Température

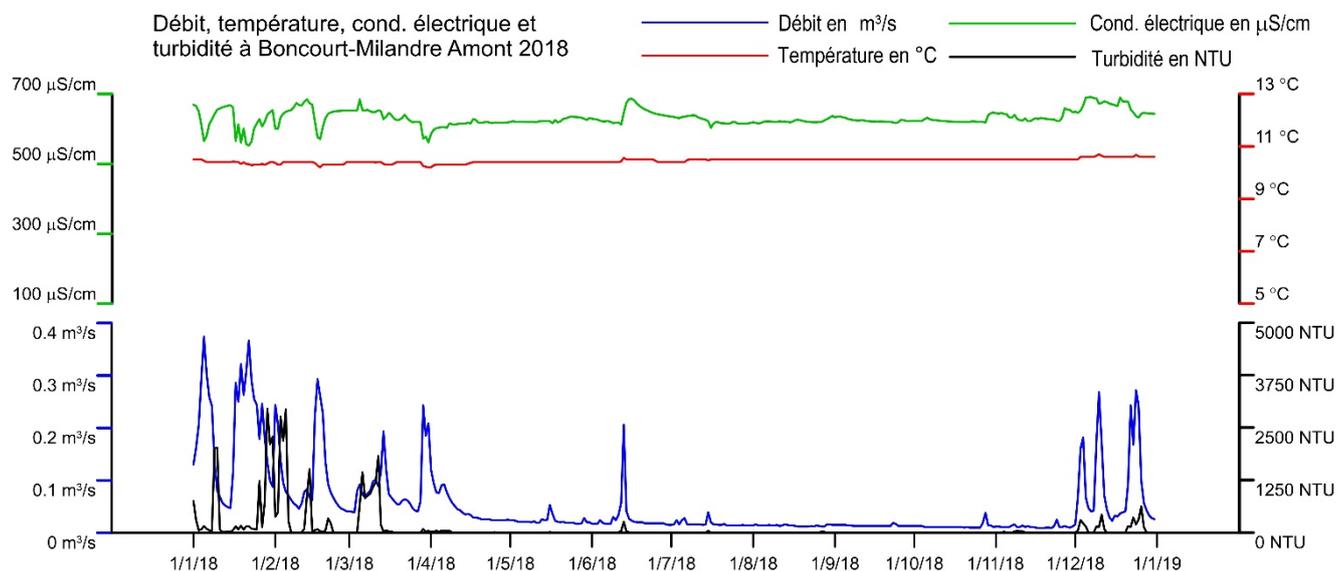
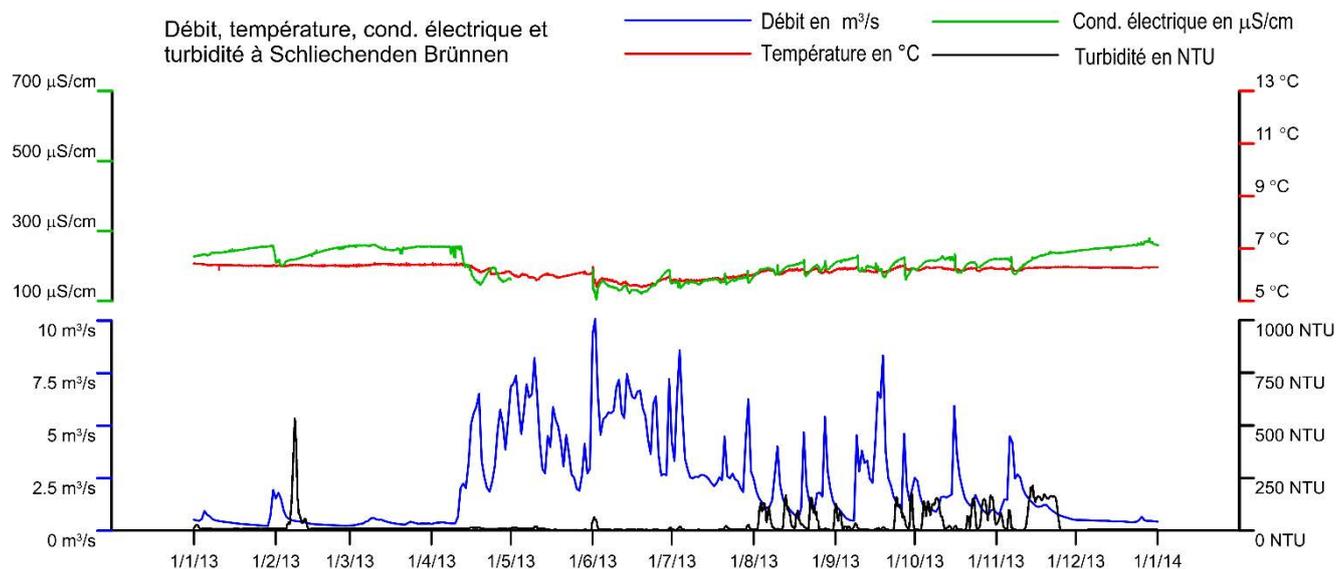
MIL présente une température assez constante sur l'année (10,2-10,8° C), ce qui correspond à la température moyenne annuelle à l'altitude de la station de mesure du débit. Le thermogramme présente des pics froids lors des crues de début d'année et des pics chauds en été et au début de l'hiver. Les faibles variations de température indiquent une recharge essentiellement diffuse (pas de pertes importantes), l'alternance de pics chauds et froids renvoyant à une zone non saturée de 50 à 100 mètres d'épaisseur.

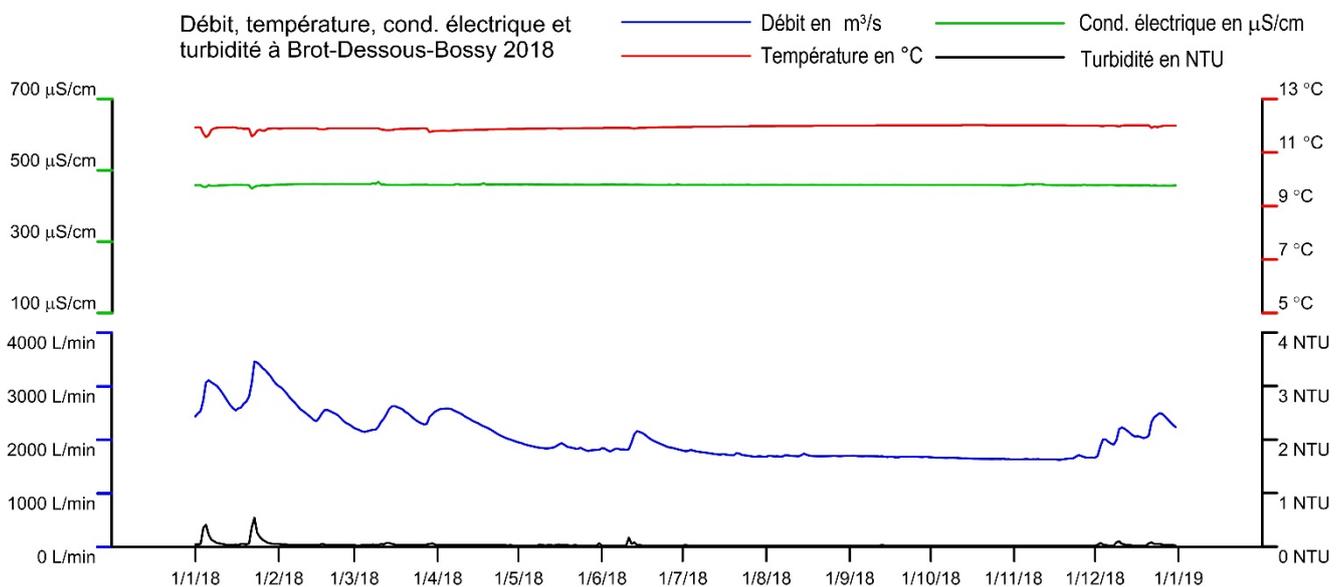
Le thermogramme de BOS est assez proche de celui de MIL, mais la température de l'eau (~11,3° C) est supérieure à la température moyenne du lieu (~9° C). Une composante thermale dans l'eau de la source est donc probable. Les très petits pics froids de température pourraient correspondre à des variations du taux de mélange entre les composantes chaudes et froides.

Le thermogramme de SB présente un cycle annuel avec une amplitude modérée (5,6-6,4° C). La température moyenne (~6° C) est un peu plus froide que la température moyenne du lieu (~7° C). Les pics de crue sont accompagnés de baisses de température quasi systématiques. L'amplitude modérée indique une recharge essentiellement diffuse (pas de pertes importantes), tandis que la présence de pics de crue systématiquement froids renvoie à une zone non saturée épaisse (> 200 m). La température plus froide que la moyenne annuelle à la station de mesure traduit le fait que l'essentiel du bassin se trouve à une altitude nettement plus élevée que la source.

Figure 14

Hydrogrammes et paramètres physicochimiques de trois stations OFEV de sources / captages en milieu karstique. Les échelles des courbes de température et de conductivité électrique sont les mêmes pour toutes les courbes. Celles des débits et de la turbidité varient trop d'une source à l'autre par garder les mêmes échelles.





Conductivité électrique

La conductivité électrique à MIL est de 610 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en moyenne et varie entre 560 et 670 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec des changements assez rapides correspondant généralement aux épisodes de crue. Elle diminue lors des crues d'hiver et augmente en été et en automne. La valeur globalement élevée indique un bassin d'alimentation couvert par un sol riche en CO_2 , donc situé à une altitude relativement faible (400 à 700 m max.), et largement couvert de zones cultivées.

À BOS, la valeur moyenne se situe aux alentours de 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et présente des variations minimales au cours de l'année. La valeur moyenne indique un bassin avec un sol modérément riche en CO_2 , donc situé à une altitude assez élevée (700 à 1000 m), probablement surtout recouvert de forêts où la $p\text{CO}_2$ des sols est plus faible que celle des zones cultivées. Les très faibles variations traduisent une infiltration et une exfiltration très diffuses.

À SB, la valeur moyenne de conductivité électrique est de l'ordre de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et présente une forte variation relative (130 à 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Le bassin doit inclure une partie de moyenne montagne avec une couverture de sol assez mince mais bien présente, permettant à une partie de l'eau de se charger en CO_2 et donc de produire des conductivités électriques de plus de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Une autre partie doit être située à plus de 1700 mètres d'altitude et présenter des surfaces calcaires dénudées qui correspondent à des conductivités électriques de l'ordre de 100 à 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Turbidité

Relevons que la turbidité aux exutoires karstiques peut être produite par la remobilisation de particules déposées dans le réseau karstique (turbidité dite autochtone) et/ou par le transfert direct de particules érodées en surface et traversant le massif karstique lors d'une crue (turbidité allochtone). La turbidité autochtone est surtout conditionnée par l'hydraulique dans le réseau de conduits karstiques, alors que la turbidité allochtone dépend plutôt des conditions d'érosion des sols, très variables selon la saison, des intempéries et des activités agricoles ou autres. L'interprétation des variations de turbidité est donc souvent assez difficile.

La turbidité à MIL varie notablement, les pics de turbidité pendant les crues pouvant atteindre plusieurs milliers de NTU. La présence de sols abondants en surface constitue une source importante de particules, qui sont

soutirées dans le système karstique. Certaines activités agricoles accentuent probablement la production de particules et l'érosion des sols.

L'eau de BOS ne présente pratiquement aucune turbidité (moins de 1 NTU). Il n'y a sans doute pas d'activités agricoles induisant une érosion des sols dans le bassin alimentant le captage ; les éventuels événements avec turbidité qui passeraient dans le système karstique sont trop courts et peu importants pour induire de la turbidité dans le drainage artificiel alimentant le captage.

À SB, les variations de turbidité ne sont que très partiellement corrélées aux variations de débit. La période avec les débits les plus élevés (fonte des neiges en été) ne présente pas les turbidités les plus élevées. Celles-ci s'observent au printemps et surtout en automne, lorsque les zones couvertes de sol participent à l'alimentation de la source (événements pluvieux). Les pics de turbidité surviennent clairement après les pics de crues, indiquant une turbidité probablement surtout allochtone.

Lien avec la vulnérabilité

Les trois sources sont alimentées par des bassins où les infiltrations sont essentiellement diffuses. Elles ne sont donc *a priori* pas fortement concernées par des zones de pertes concentrées où la vulnérabilité pourrait être très élevée. Les eaux du captage BOS sont visiblement captées indirectement, les paramètres physico-chimiques y sont très stables, la vulnérabilité de l'ensemble du bassin y est probablement faible. Le bassin de MIL est visiblement bien karstifié, mais présente une couverture de sol globalement importante et pas ou peu d'infiltrations concentrées. La vulnérabilité globale de ce bassin est donc modérée. Le système de SB est certainement très karstifié et couvert d'un sol mince ou absent dans sa partie supérieure. Dans ces zones, la vulnérabilité est globalement élevée.

A4 Pertes placées en zone S1

A4-1 Introduction

Dans l'aide à l'exécution (OFEV 2022), on peut lire à la page 8 : « Contrairement à l'ancien système de zones de protection des eaux souterraines, la zone S1 englobe uniquement l'installation de captage et les terrains directement environnants, ainsi que les pertes et leur environnement immédiat si elles constituent une menace pour l'utilisation de l'eau potable. Large d'au moins 100 m dans le sens du courant, la zone S2 est délimitée uniquement autour du captage. »

Il est aussi précisé en page 16 : « Concernant les pertes, la zone S1 est uniquement délimitée s'il existe une menace pour l'utilisation de l'eau potable. Si une telle menace existe concrètement, il convient de procéder à une évaluation sur la base de critères hydrologiques comme le volume d'eau qui s'infiltre, la relation rapide avec le captage, etc. Les bases pour cette évaluation sont décrites dans le guide pratique « Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques » (« méthode EPIK »). »

Cette définition est sujette à une marge d'interprétation laissée à l'hydrogéologue (voir ci-après).

A4-2 Principe

La zone S1 autour des pertes est délimitée aux endroits où la vulnérabilité est supérieure à celle d'une zone Sh. Or dans leur définition, les zones Sh sont définies par des points de protection compris entre 0 et 75. La délimitation d'une zone S1 implique donc des conditions supplémentaires en plus d'un très faible nombre de points de protection (max. 2 points).

Cette attribution n'est donc en principe possible que pour les sites qui entrent dans la classe la plus vulnérable de l'épikarst, à savoir « gouffre avec perte active ». Dans ce cas, E et P valent alors 0 point, et l'évaluation se fait uniquement avec les paramètres I et K. Toutefois, pour placer une perte en zone S1, celle-ci doit constituer une menace significative pour l'utilisation de l'eau potable. Les seuls points de protection issus de l'approche EPIK ne suffisent donc pas à cette attribution.

Pour placer une perte en zone S1, il faut que toutes les conditions suivantes soient réunies :

- la perte est active de manière pérenne ;
- la restitution de masse d'un traceur injecté dans la perte aux exutoires totaux du système est supérieure à 80 % ;
- le débit de la perte vers les eaux souterraines représente au moins 20 % du débit total des exutoires du système ;
- le temps de parcours entre la perte et le captage est inférieur à 48 heures.

Si certaines de ces conditions ne sont pas réunies, alors la perte sera placée en zone Sh, même si le nombre de points de protection est très faible (0 ou 1).

Les pertes remplissant les conditions décrites ci-dessus sont rares, particulièrement en amont d'un captage d'eau potable.

A5 Trois exemples d'application (St-Imier, La Brévine et Tsanfleuron)

A5-1 Introduction

Trois bassins tests ont été traités avec l'approche semi-automatique de la méthode EPIK 2.0. Le but était de vérifier l'applicabilité de la méthode et de valider la cohérence des critères retenus, à l'échelle d'un bassin, mais également au travers de contextes assez contrastés (Jura et Alpes).

Précisons que les cartes obtenues n'ont pas été validées ni notablement ajustées en fonction des connaissances spécifiques du terrain (travail de l'hydrogéologue spécialiste). Ces cartes n'ont donc qu'une valeur d'exemple, mais ne reflètent nullement les cartes définitives et officielles des zones de protection des trois régions considérées.

La délimitation de certains des bassins d'alimentation des captages a été révisée ces dernières années. La délimitation présentée ici ne correspond pas à la version la plus à jour.

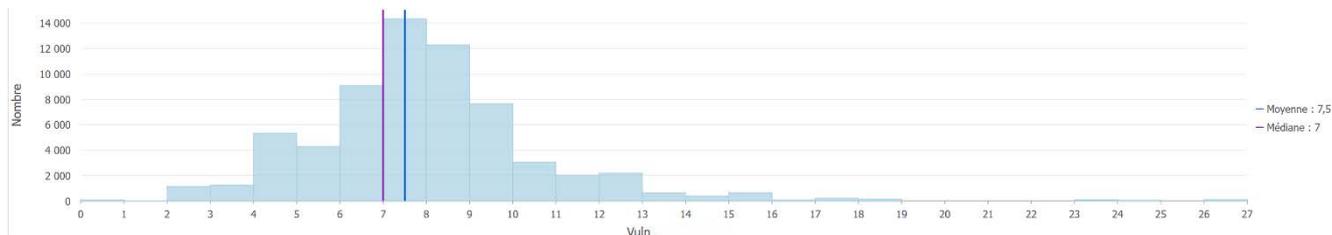
Pour chaque exemple, les cartes E, P, I et K sont présentées, ainsi que la carte des points de protection (carte de vulnérabilité) qui résulte de leur combinaison. La carte des zones de protection est également donnée (à titre d'exemple toujours).

Quelques situations particulières, pour lesquelles une certaine interprétation est nécessaire, sont présentées à la fin de cette annexe.

A5-2 Résultat pour la région de St-Imier (source de la Raisetette à Cormoret)

Le système d'écoulement comprend la source captée de la Raisetette à Cormoret, mais également différents trop-pleins situés vers la source de la Dou et du Torrent.

Le nombre de points moyen pour la vulnérabilité dans ce bassin est de 7,5. La médiane est de 7.



Les zones vulnérables sont :

- les bassins versants des pertes et pertes diffuses ; notons que certaines pertes diffuses sont seulement supposées ;
- les dolines, les pertes et les zones sans sol.

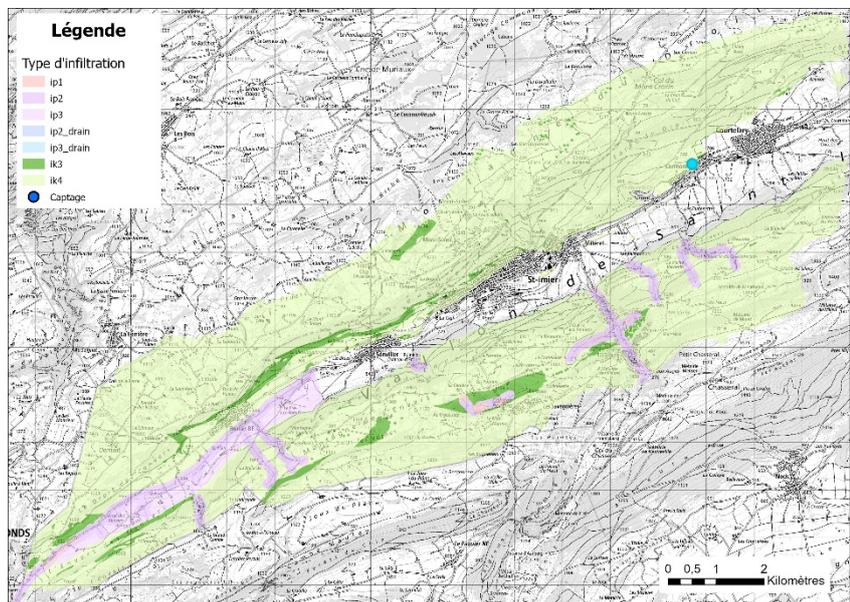
Le reste du bassin d'alimentation du captage est en zone d'écoulement diffus ou semi-diffus, et a une protection dictée par la présence du sol et de l'épikarst.

Les cartes des paramètres I, P, E et K, ainsi que la carte de vulnérabilité et la carte indicative des zones de protection sont reproduites ci-après.

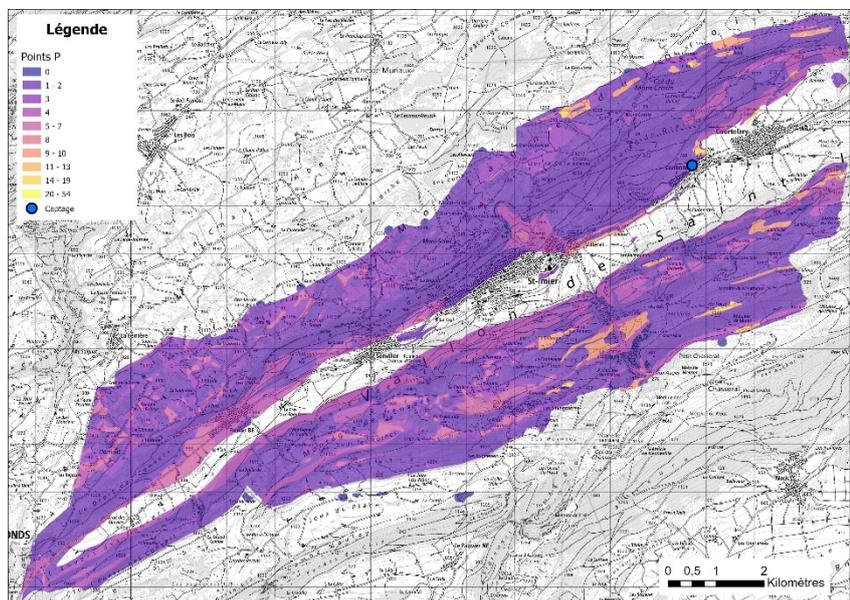
La carte finale indique que l'essentiel du bassin est attribué à la zone Sm. Les zones Sh se limitent soit à une zone avec peu de sol et peu éloignée du captage (K=1), soit aux cours d'eau alimentant les pertes supposées. Une bonne partie de ces pertes correspondant à des cours d'eau supposés infiltrants, l'hydrogéologue ayant une bonne connaissance du terrain peut le cas échéant ajuster les cartes en conséquence.

Certaines zones marneuses avec couverture quaternaire aboutissent à plus de 15 points de protection, donc à des zones Au ou Ao.

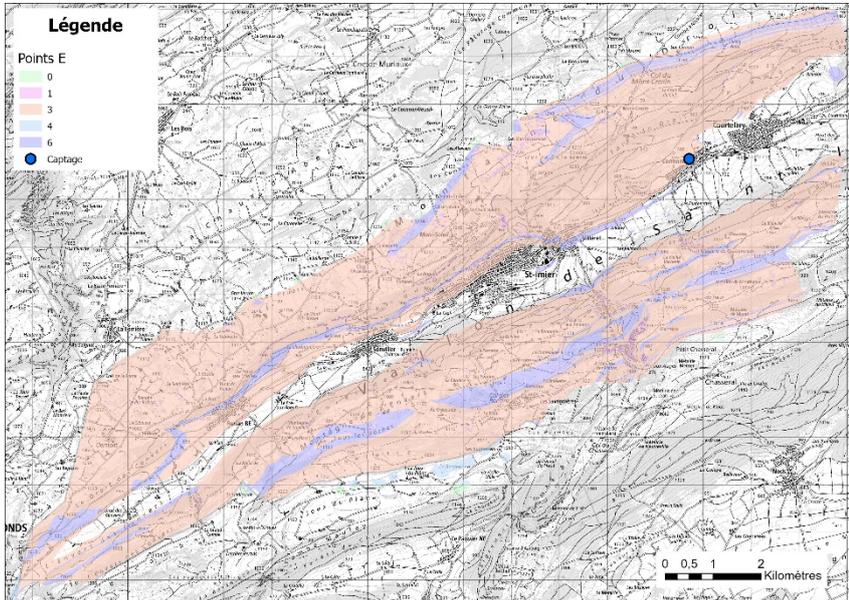
Paramètre infiltration I (I_p et I_k)



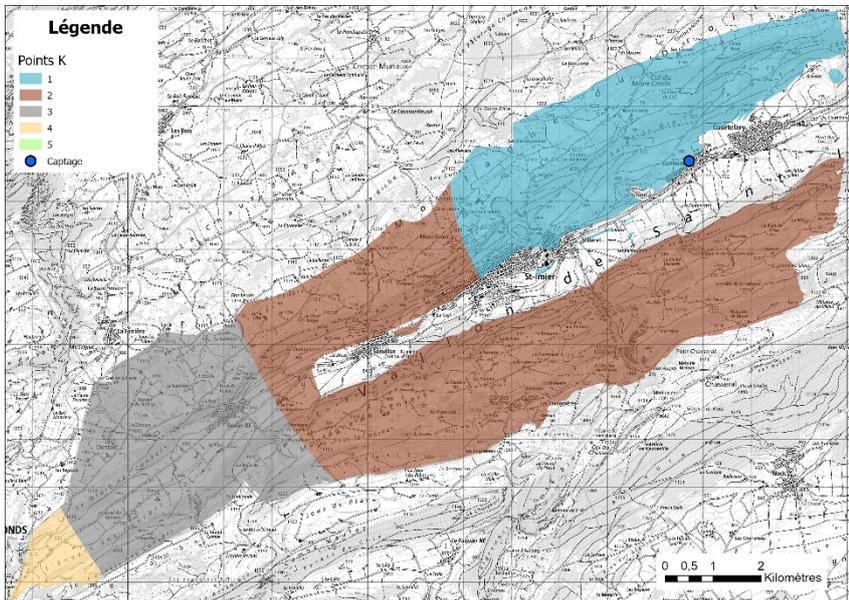
Paramètre P (n'est pas considéré dans les zones I_p et doit être divisé par 2 dans les zones I_k3)



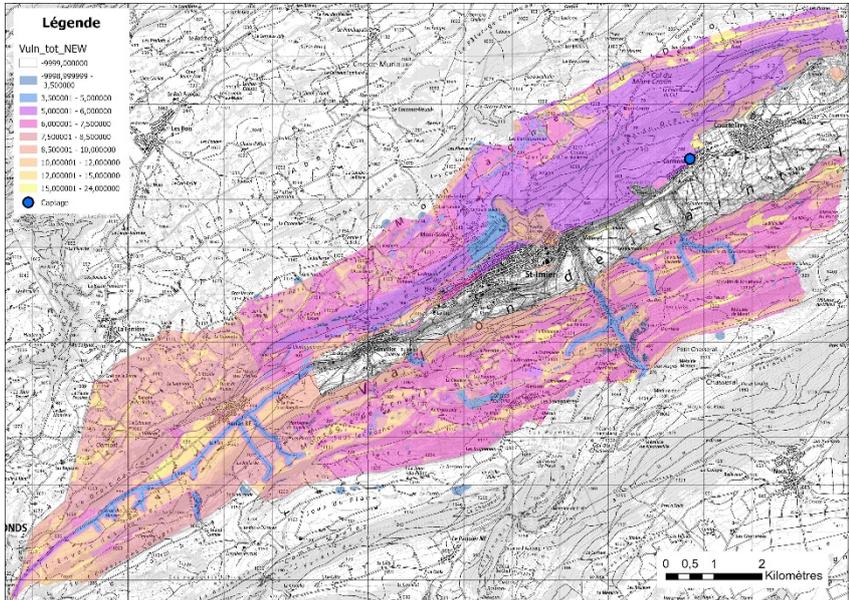
Paramètre E (n'est pas considéré dans les zones I_p et doit être divisé par 2 dans les zones I_{k3})



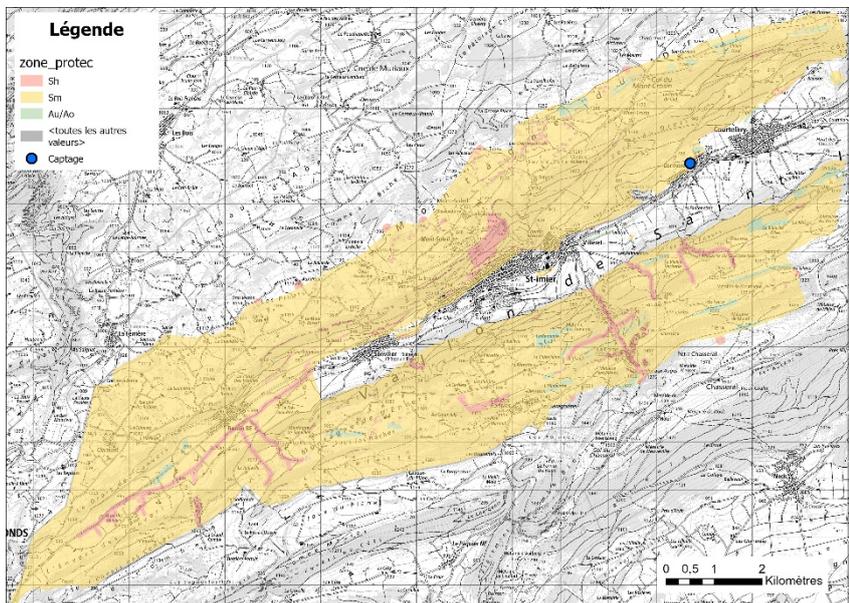
Paramètre K



Nombre de points de protection (vulnérabilité)



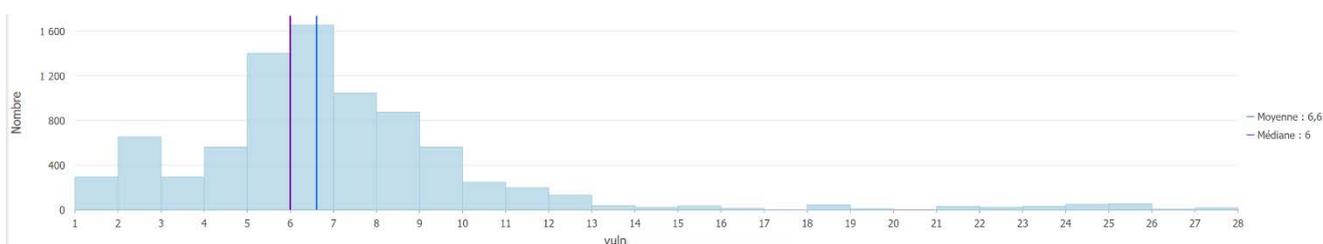
Type de zones de protection (à partir de la vulnérabilité)



A5-3 Résultats pour le bassin du puits de La Brévine

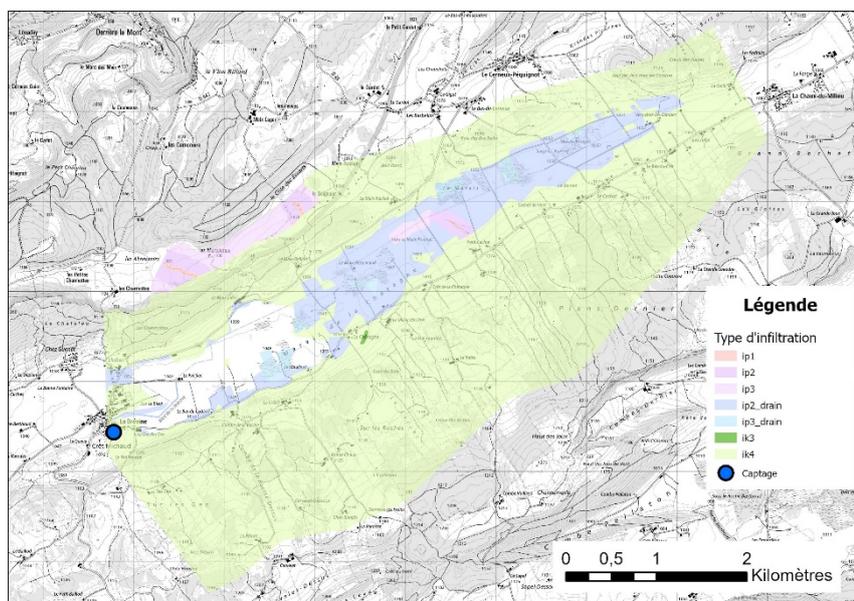
Il s'agit du bassin d'alimentation du puits de pompage de La Brévine, qui extrait l'eau dans la nappe souterraine du fond de la Vallée de La Brévine. Ce bassin inclut une grande étendue marécageuse drainée vers des pertes, ce qui rend ces zones assez vulnérables (la protection est obtenue uniquement par le sol sur les drains et, dans une certaine mesure, par le réseau karstique). Les zones très vulnérables sont donc les bassins de pertes de cours d'eau et des zones drainées assez proches du captage.

Le nombre de points moyen pour la vulnérabilité dans ce bassin est de 6,6. La médiane est de 6.

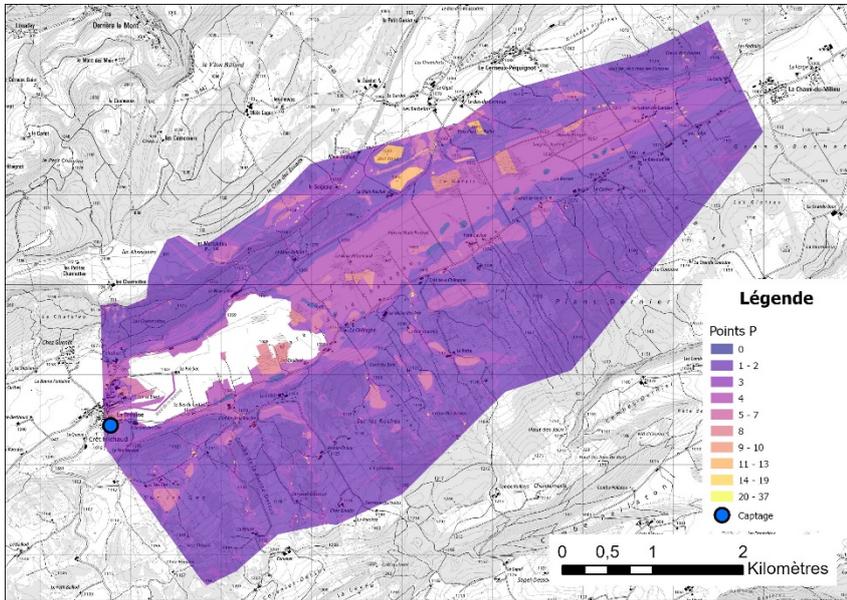


Dans cet exemple, seule une petite partie du bassin est placée en zone Sh (moins de 5 points de vulnérabilité). Toutefois, la zone avec 5 à 6 points de vulnérabilité est vaste ; une légère différence sur l'évaluation de l'épaisseur de sol au-dessus des drains aboutirait à des zones Sh largement plus vastes.

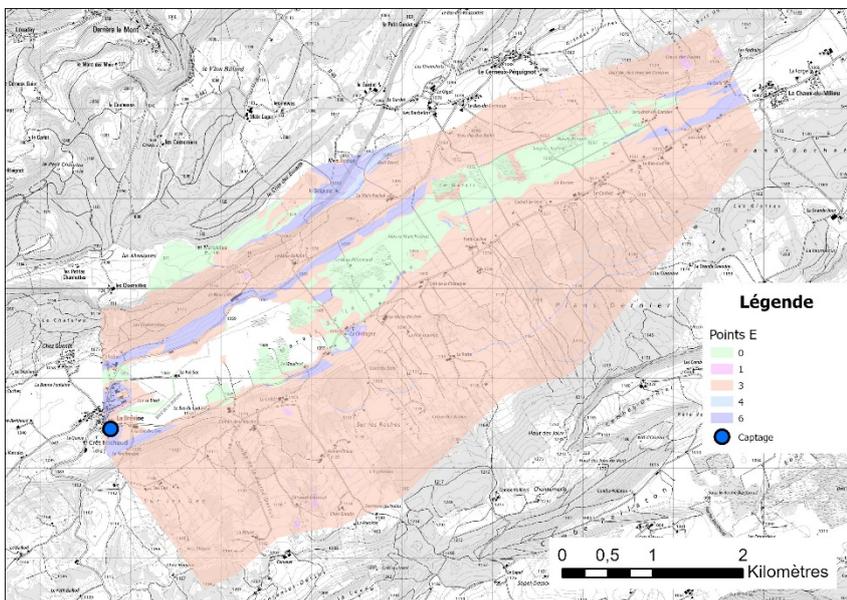
Paramètre I (I_p et I_{k3})



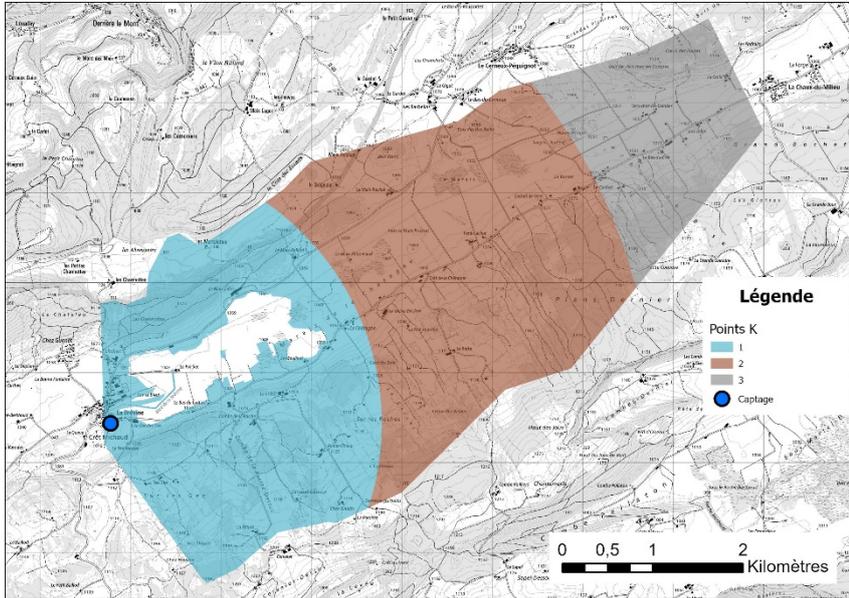
Paramètre P (n'est pas considéré dans les zones I_p et doit être divisé par 2 dans les zones I_{k3})



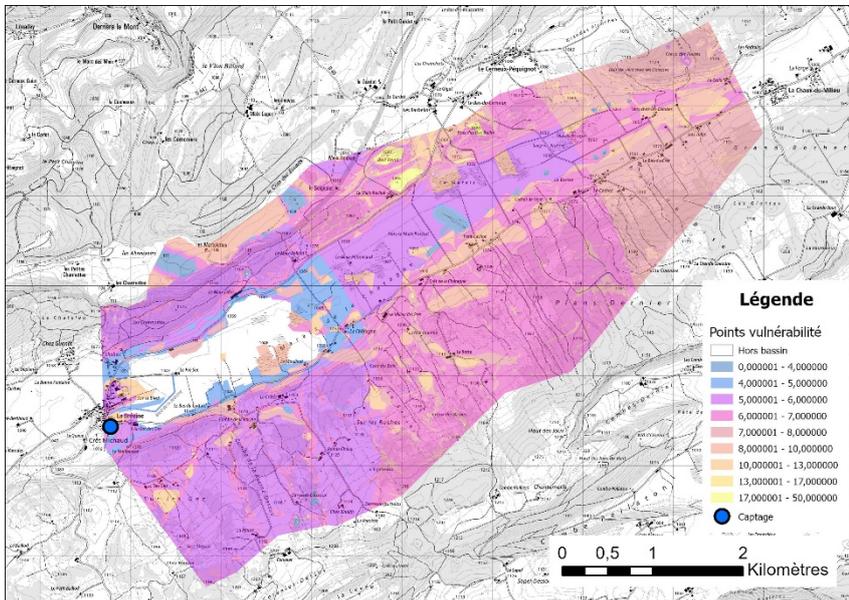
Paramètre E (n'est pas considéré dans les zones I_p et doit être divisé par 2 dans les zones I_{k3})



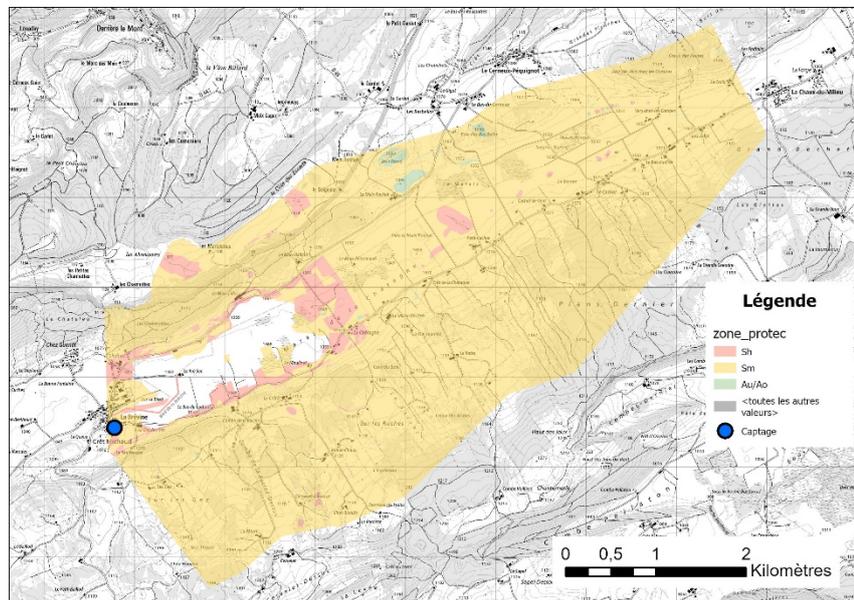
Paramètre K



Nombre de points de protection (vulnérabilité)



Type de zones de protection (à partir de la vulnérabilité)



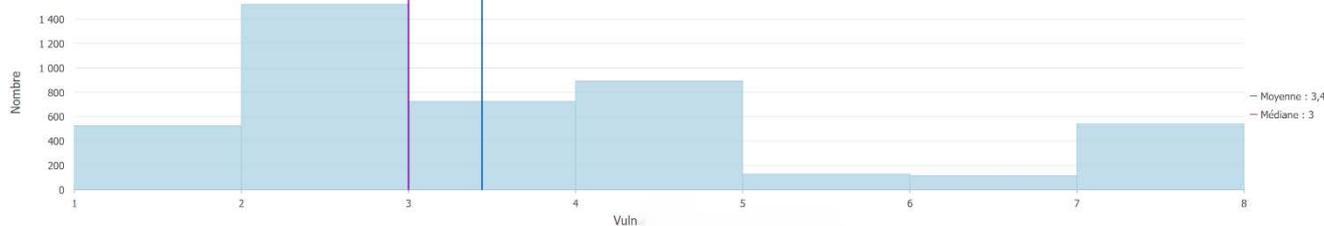
A5-4 Résultats pour la région de Tsanfleuron, captage de Glarey

La carte du karst et la carte d'épaisseur des terrains de couverture n'existaient pas pour cette zone. L'épaisseur de la couverture a donc été estimée en fonction de la présence de sol (couche perméable) et de quaternaire (geocover).

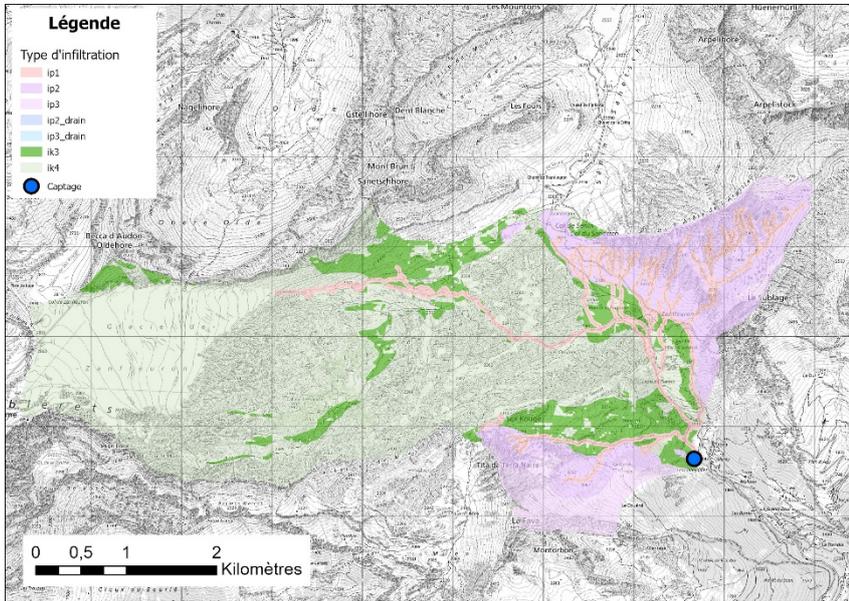
La majeure partie du bassin d'alimentation estimé est constituée de rocher affleurant sans sol, et malgré une infiltration globalement plutôt diffuse, de grandes surfaces doivent être considérées comme très vulnérables.

Le nombre de points moyen pour la vulnérabilité dans ce bassin est de 3,4. La médiane est de 3. Les valeurs sont plus faibles que celles obtenues dans le Jura en raison d'une plus faible couverture de sol.

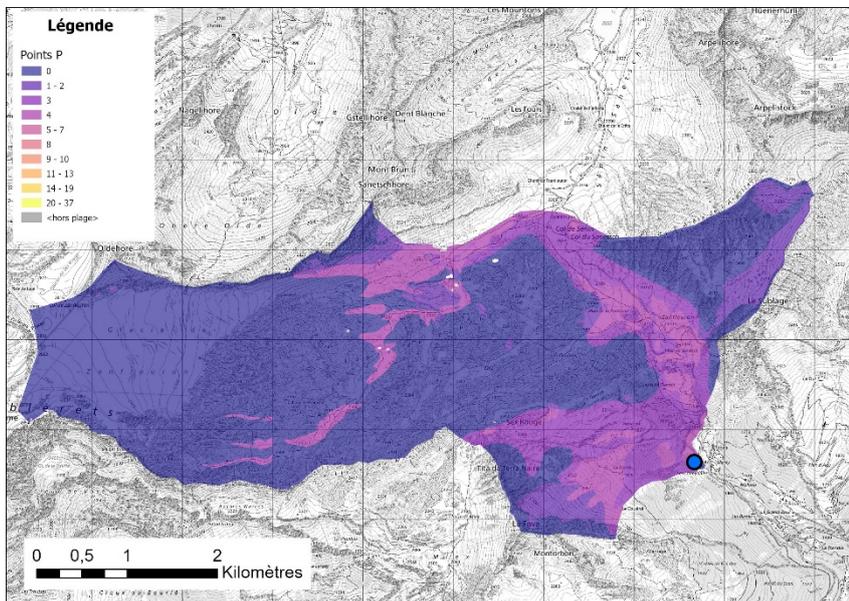
Pour I_p , le nombre de points moyen pour la vulnérabilité est de 4,0.



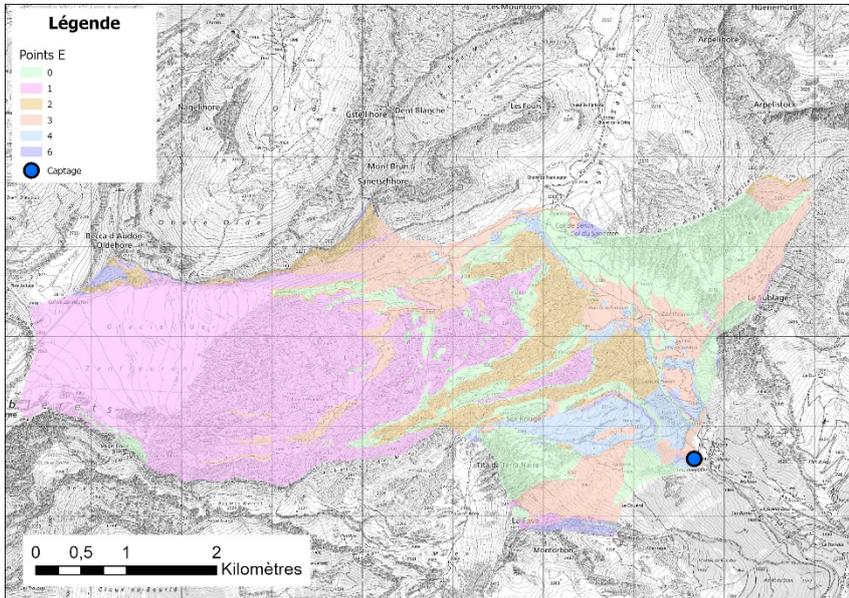
Paramètre I (I_p et I_k)



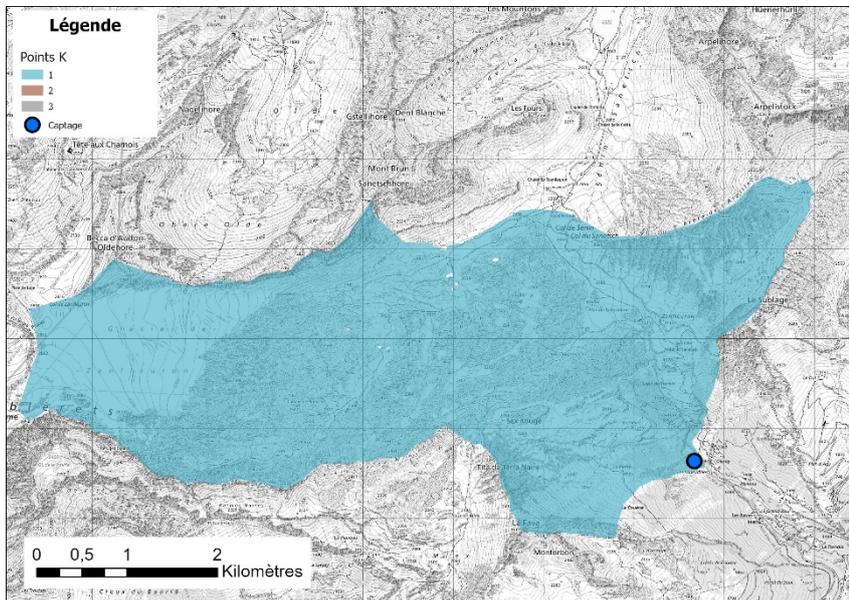
Paramètre P (n'est pas considéré dans les zones I_p et doit être divisé par 2 dans les zones I_{k3})



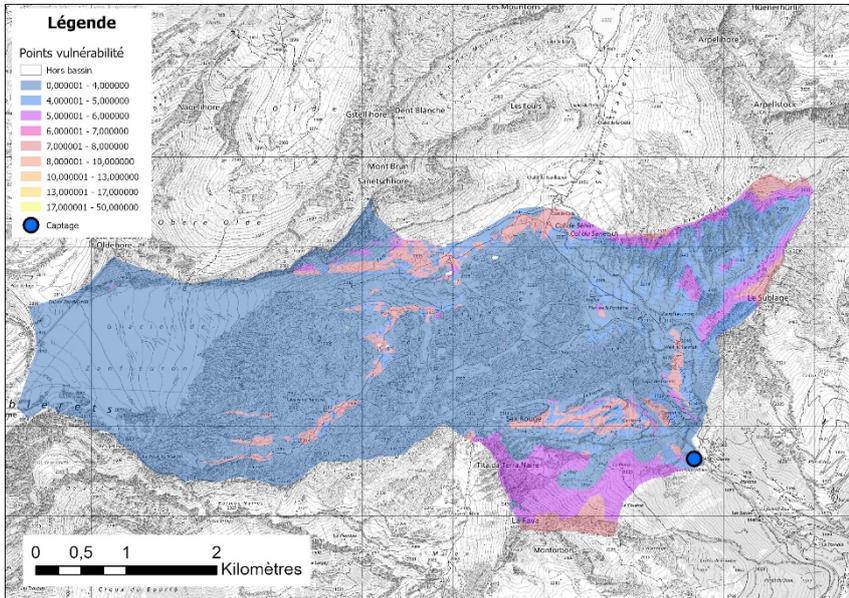
Paramètre E (n'est pas considéré dans les zones I_p et doit être divisé par 2 dans les zones I_{k3})



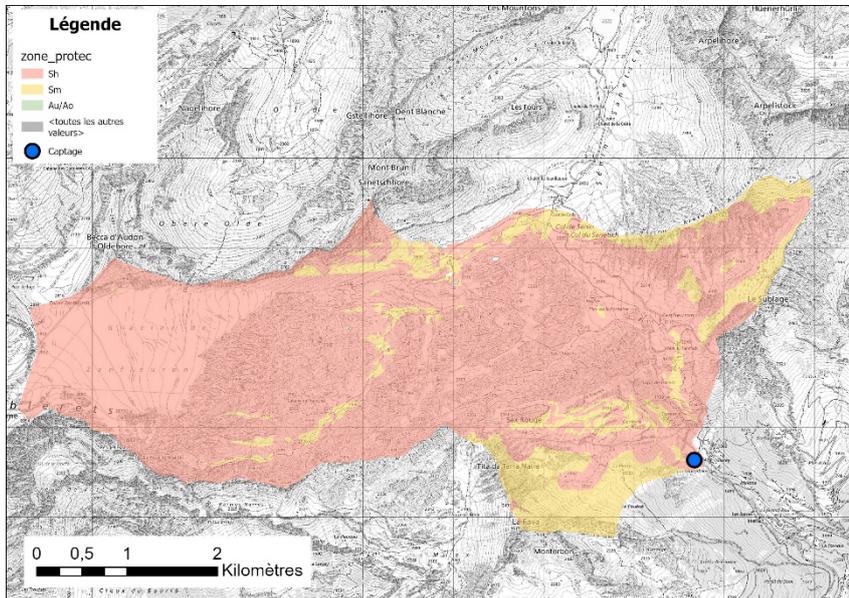
Paramètre K



Nombre de points de protection (vulnérabilité)



Type de zone de protection (à partir de la vulnérabilité)



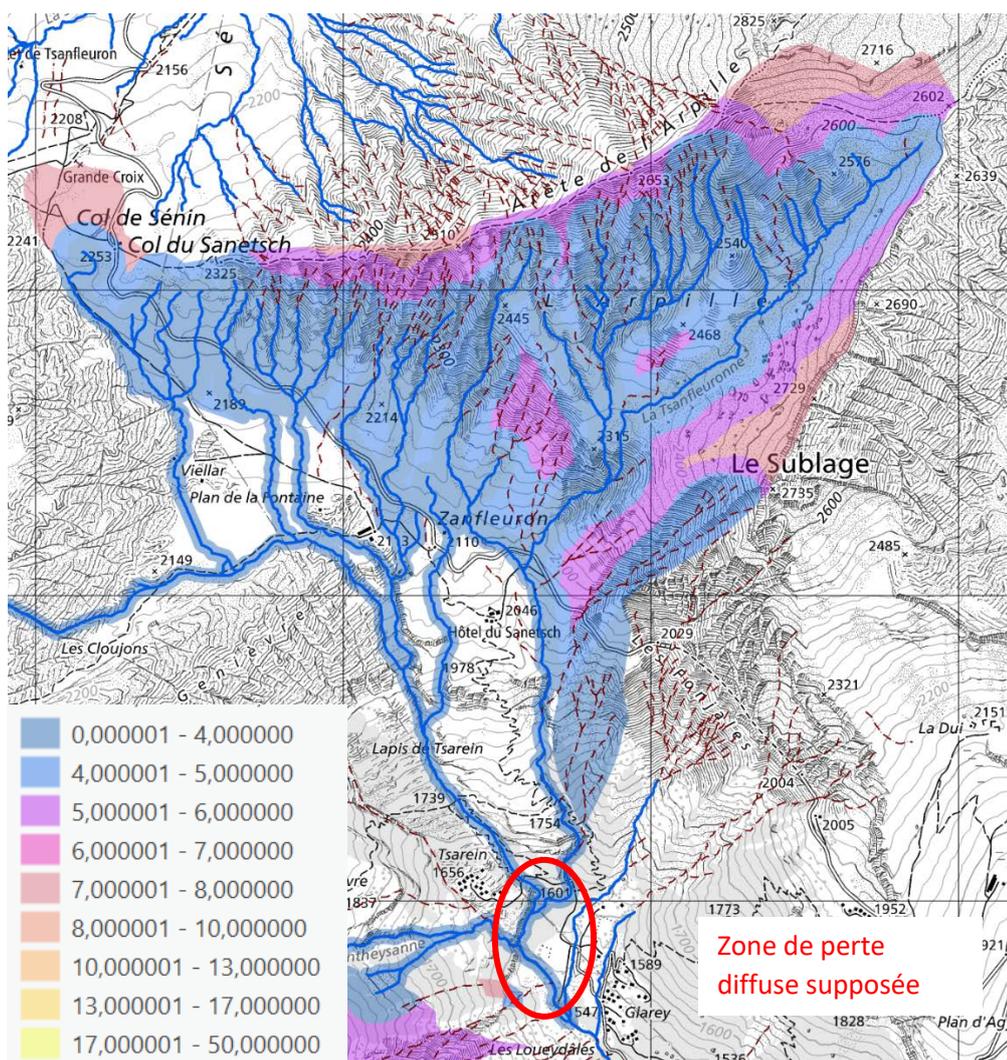
A5-5 Cas particuliers

Tsanfleuron : ruisseaux en terrain non karstiques

La figure ci-après représente la partie est du bassin d'alimentation du captage. On y voit une zone de perte diffuse supposée d'un cours d'eau (en bas de la carte) et les cours d'eau qui l'alimentent avec leur bassin versant.

La perte est ici alimentée par un vaste réseau de cours d'eau en provenance d'une zone non karstique. Comme elle est diffuse et seulement supposée, il a été admis que seule une petite partie de l'eau finissait dans la perte et donc au captage. Ainsi, 2 points de protection supplémentaires sont attribués à l'ensemble du bassin d'alimentation de la perte diffuse. Des investigations supplémentaires pourraient moduler cette valeur.

Extrait de la carte des points totaux de vulnérabilité de la zone d'argilite et des marnes de l'Arpille. Un écoulement concentré à semi-concentré est admis (I_p1 , I_p2 , I_p3). Les points de protection (surfaces colorées) sont attribués aux bassins des cours d'eau (traits bleus) et aux ravines (tirets bruns). La perte diffuse supposée est marquée par un cercle rouge. Les zones non colorées sont soit karstiques (infiltration diffuse), soit hors du bassin d'alimentation du captage de Glarey.



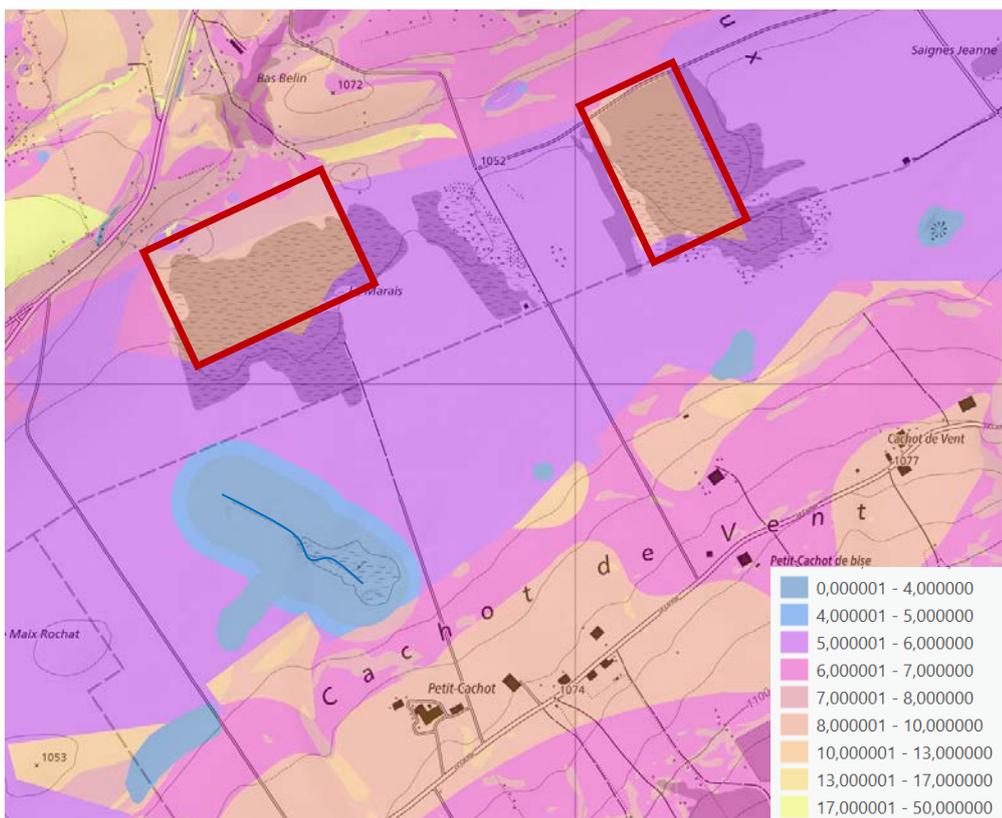
La Brévine : drainage avec rejet de l'eau dans des pertes

Dans les zones drainées, où l'eau des drains se déverse directement dans des pertes, la protection est apportée par les sols présents au-dessus des drains ($P = 4$) et par la distance au captage ($K = 2$). Elles totalisent donc 6 points de protection. Les zones de pertes ne sont protégées que par le réseau karstique ($K=2$).

Un petit cours d'eau (trait bleu) se jetant dans une des pertes est également présent (I_p1 et I_p2).

Les zones marécageuses non drainées (marais protégé, rectangles rouges) sont peu vulnérables. L'eau ne s'infiltre pas dans la roche et s'écoule peu (absorption par le marais). Le faible écoulement présent finit indirectement dans les pertes. Il est atténué par une grande épaisseur de sol ($P = 8$).

Extrait de la carte des points totaux de vulnérabilité



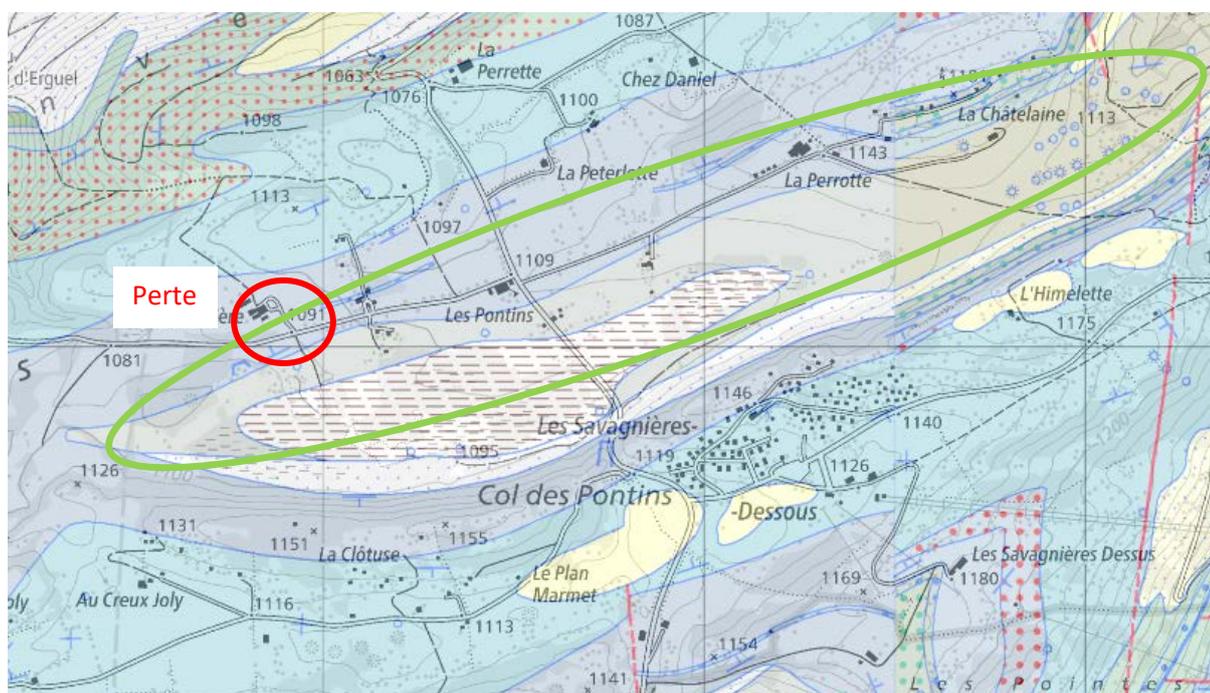
St-Imier : zones marneuses et marnes avec pertes

Entourée de vert, une zone marneuse est en partie marécageuse avec de nombreuses dolines, pertes et petits cours d'eau. Les zones proches du cours d'eau sont considérées comme bassin de perte (I_p2). Les zones plus éloignées dans le bassin topographique de la perte sont considérées comme un écoulement semi-diffus (I_k3) à cause des signes d'infiltration partielle directe. Plusieurs dolines constituent des points d'infiltration semi-concentrée (en bleu).

Extrait de la carte des points totaux de vulnérabilité

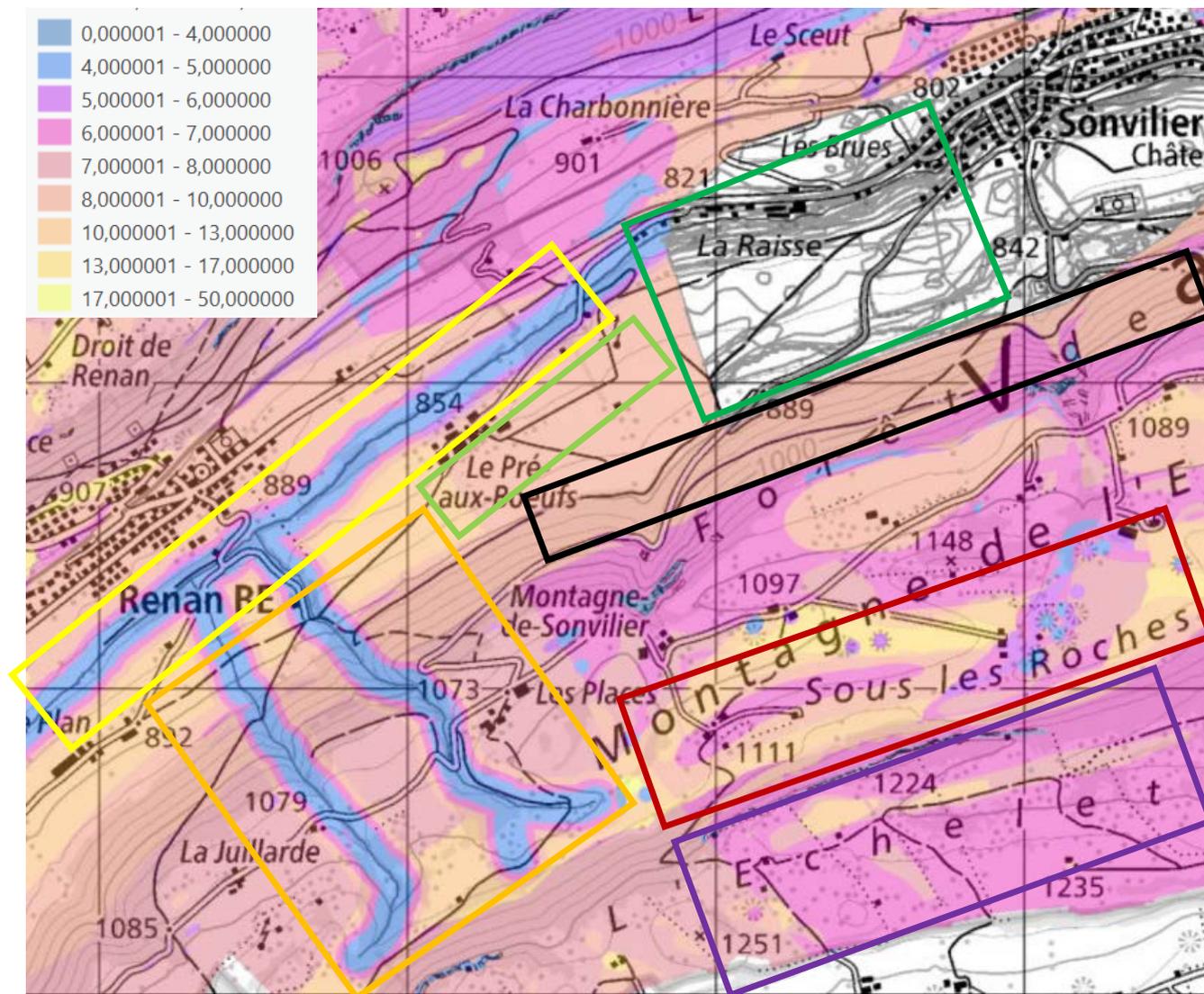


Carte géologique geocover (swisstopo)



Autres situations typiques dans la région de Renan – Sonvilier

Extrait de la carte des points totaux de vulnérabilité



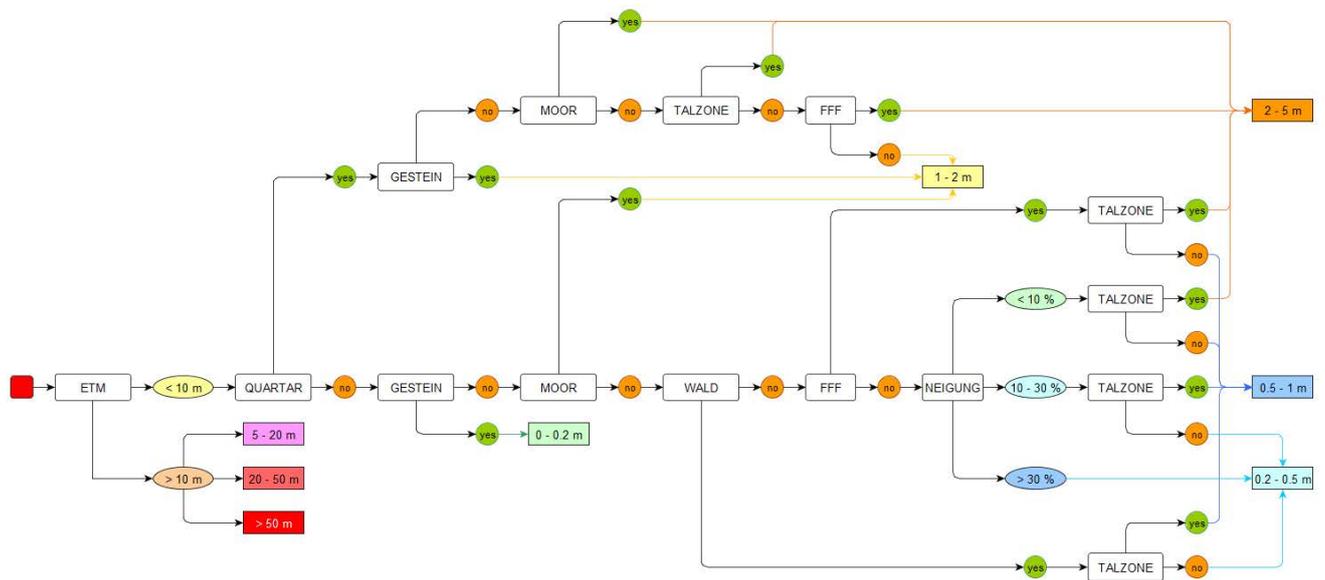
Zone	Type	Pts I	Pts P	Pts E	Pts K	Commentaire
Yellow	I _p 1, I _p 2	0-7	Nul	Nul	3 - 4	Cours d'eau (I _p 1) avec pertes diffuses et abords du cours d'eau (I _p 2) <= 100 m.
Orange	I _p 1, I _p 2	0-7	Nul	Nul	4	Ruisseaux tirés du GWN. Terrain karstique infiltrant. Ces cours d'eau sont temporaires, mais concentrent l'eau lorsqu'il y en a.
Green	I _p 3	8	Nul	Nul	3 - 4	Non karstique allogénique, c'est-à-dire alimentant le karst.
Black	Hors BA	-	-	-	-	Non karstique n'alimentant pas le karst. Hors bassin d'alimentation du captage.
Red	I _k 3	Nul	2-7	6/1doline	3 - 4	Zone marneuse avec nombreuses dolines indiquant que l'eau se perd.
Purple	I _k 4	Nul	2-7	3	3	Zone karstique peu pentue, perméabilité du sol moyenne.
Black	I _k 4	Nul	4	3	3	Zone karstique pentue en forêt, perméabilité du sol moyenne.

A6 Cartographie automatisée des épaisseurs de couverture

En utilisant différents jeux de données existants et couvrant le territoire national, il est possible de produire de manière automatique une carte de l'épaisseur des sols. Il s'agit d'une approximation qui n'est pas validée directement par des mesures de terrain. Elle peut servir de base à une cartographie plus détaillée ou éventuellement être utilisée directement. La figure 15 présente le schéma de décision et d'utilisation des données.

Figure 15

Données et étapes nécessaires à l'élaboration d'une carte d'épaisseur de la couverture (modifié d'après Hamedinger, 2019).



A7 Travail avec le SIG

A7-1 Principe

De nombreuses géodonnées, couvrant le territoire avec une assez bonne précision, permettent d'établir une première version des cartes des paramètres E, P, I et K de manière semi-automatique. Les données utilisables sont principalement topographiques et géologiques. Elles peuvent être téléchargées, rassemblées et combinées dans un SIG. En suivant les règles décrites dans le présent guide pratique, résumées à la figure 9 (chapitre 4.7), il est possible d'attribuer des points de protection en chaque point du bassin d'alimentation du captage / de la source, et donc de définir les zones de protection. L'avantage de cette approche est qu'elle est complètement transparente et reproductible (pour autant que les données de base utilisées ne changent pas). Avec un peu de programmation SIG, il est possible de couvrir des zones assez étendues de manière semi-automatique. Toutefois, les données disponibles n'étant pas parfaites, l'expertise d'un ou d'une spécialiste et des observations sur le terrain sont souvent nécessaires pour ajuster la carte dans les zones où les données sont manquantes ou erronées. L'approche semi-automatique fournira une carte indicative que l'hydrogéologue ajustera pour aboutir à une carte fiable et validée.

A7-2 Sources de données

Le paramètre I, qui consiste à assigner un type d'infiltration, et, en particulier, à identifier des zones de pertes et d'infiltrations concentrées ainsi que leurs bassins d'alimentation, est un point clé de la méthode EPIK 2.0. Les données disponibles sont souvent insuffisantes pour établir une bonne carte, car les pertes (concentrées ou diffuses) sont rarement cartographiées, et leurs bassins d'alimentation encore plus rarement. L'expertise et la connaissance du terrain des spécialistes sont ici très importantes pour compléter ou corriger les données de base.

Le paramètre K est facile à cartographier automatiquement en fonction des distances, mais doit souvent être ajusté en fonction des résultats des essais de traçage.

Les paramètres P et E sont ceux pour lesquels les données du territoire sont les plus utiles. La « carte du karst » (ISSKA, 2022) peut servir de base pour évaluer ces paramètres en utilisant quelques données complémentaires.

Le tableau 9 référence les variables à définir pour calculer chaque paramètre (E, P, I et K) et les sources de données numériques disponibles pour l'ensemble du territoire suisse. Il s'agit ici d'une proposition. D'autres sources de données peuvent être utilisées, en particulier des données locales. La dernière colonne du tableau 9 indique quelles données sont disponibles directement dans la carte du karst. Si cette dernière existe, elle peut servir de base pour appliquer la méthode EPIK 2.0.

Tableau 9

Paramètres et données nécessaires à l'évaluation EPIK 2.0

Paramètre à calculer	Variables (données) nécessaires	Source des données (proposition)	Disponible dans la carte du karst
Zone d'étude	Bassin d'alimentation du captage / de la source	À cartographier (annexe 2)	Non
	Nature des terrains	Geocover, nature des formations rocheuses sous couverture à cartographier (à définir : karstique / semi-karstique / non karstique)	Oui, D_infiltr
	Zones allogéniques	À cartographier	Oui, EZGG
	Zone de subartésianisme / exfiltrante	À cartographier	Oui, SubArtes
I	Pertes	Geocover, carte hydrogéologique, évent. terrain	Non
	Lacs infiltrants	Carte hydrogéologique	Oui, EZGG
	Pertes diffuses (cours d'eau)	Carte hydrogéologique, évent. terrain	Oui ⁶ , GW25
	Zones allogéniques	À cartographier	Oui, EZGG
	Pente et pied de pente	À calculer et reclassifier depuis le MNT (outil pente)	Non
	Présence de forêt	Vector 25 surfaces primaires	Oui, D_INFILTR
	Ruissellement	À calculer depuis la pente et la perméabilité (tableau 10)	Non
	Drainage	Données des cantons / Agroscope (Drainagekarte Schweiz)	Non
P	Épaisseur des terrains de couverture (sol et quaternaire)	Geocover, à calculer selon annexe 5, évent. terrain pour vérification	Oui, D_INFILTR
	Nature des terrains de couverture (sol et quaternaire)	Bodeneignung : Kulturtyp, Geocover	Oui, D_INFILTR
	Perméabilité des terrains de couverture (sol et quaternaire)	Sol : aptitude du sol / type de culture (à reclassifier). Quaternaire : à définir selon les propriétés des unités Geocover	Non
E	Nature des terrains	Geocover, nature des formations rocheuses sous couverture à cartographier (à définir : karstique / semi-karstique / non karstique)	Oui, D_INFILTR
	Épaisseur des terrains de couverture (sol et quaternaire)	Geocover, à calculer selon annexe 5, évent. terrain pour vérification	Oui, D_INFILTR
	Altération, délitage	Épaisseur des bancs (colonnes stratigraphiques – strati.ch), autre	Non
	Lapiaz	À cartographier ou à approximer (terrains karstiques et absence de couverture meuble)	Non
	Doline	Geocover, carte topographique, inventaires cantonaux, évent. à cartographier	Non
	Grottes	Geocover, carte topographique, inventaires spéléologiques	Non
K	Zone non saturée, rivière souterraine, zone noyée	Essais de traçage ou à calculer selon les recommandations générales EPIK (chapitre 4.6)	Non

⁶ Estimation a priori du potentiel d'infiltration des cours d'eau traversant les zones karstiques, une évaluation sur le terrain serait souhaitable.

A7-3 Outils SIG et application par étapes

Le tableau 10 présente un exemple de marche à suivre et d'outils SIG utilisables. La première étape consiste à définir le bassin versant qui correspond à la zone d'étude. L'étape suivante (collecte des données nécessaires) représente une grosse partie du travail, et consiste à rassembler, formater et catégoriser toutes les variables décrites ci-dessus. La suite consiste en la quantification de chaque paramètre (E, P, I, K) en combinant les différentes variables. Pour finir, il s'agira de calculer les points de protection totaux et de les convertir en zone de protection. À chaque étape, des indications sont données sur les chapitres et tableaux du présent rapport auquel se référer pour plus de détails.

Dans la pratique, une boîte à outils ou/et des scripts python peuvent être créés pour faciliter la routine de calcul et produire des cartes de manière semi-automatique. De plus, l'attribution de « domaines » permet une lecture facilitée des attributs sous forme de texte. Une couche de symbologie (fichier lyrx) apporte une uniformité et facilite la lecture des cartes.

A7-4 Corrections apportées par l'hydrogéologue

Avec un peu de routine et une bonne maîtrise des outils SIG, on aboutit assez facilement à une carte semi-automatique de vulnérabilité, ce qui permet de couvrir de grandes surfaces en un temps assez limité. Bien que certaines étapes requièrent une interprétation par un ou une spécialiste, cette méthode laisse peu de flexibilité et fournit des résultats transparents et reproductibles.

En se basant sur ces premiers résultats, le ou la spécialiste (hydrogéologue connaissant bien la région d'étude) identifiera les zones où les données de base sont lacunaires ou incorrectes. Des recherches dans la littérature, des observations sur le terrain et des essais de traçage seront nécessaires pour ajuster la carte.

Pour maintenir la transparence dans la démarche, les compléments et corrections apportés seront rassemblés dans le SIG dans des couches d'information supplémentaires. Ainsi, l'apport de l'hydrogéologue sera documenté de manière explicite, ce qui facilitera d'autres ajustements éventuels dans le futur. Ces nouvelles couches contiennent tous les ajustements apportés aux données de base, aux différents attributs ou directement à la vulnérabilité finale. Par exemple, le nombre de points de protection attribué au paramètre épikarst peut être modifié si un lapiaz n'a pas été identifié comme tel dans la routine SIG à partir des données de base. Un autre cas, assez fréquent, est de devoir attribuer une lithologie et un type d'infiltration à une zone indiquée comme glacier dans le Geocover, mais où la glace a disparu depuis la publication de la carte géologique.

Tableau 10*Travailler avec les SIG : marche à suivre sommaire*

Étape de travail	Sans carte du karst	Avec carte du karst	Chapitres et tableaux concernés	Outils ArcGIS pro proposés
Zone d'étude	Définir le bassin d'alimentation du captage étudié. Il correspond à la zone à cartographier.		Annexe 2	Nouveau shapefile
Collecte des données nécessaires	Un fichier shape « EPK » est créé. Y intégrer toutes les variables nécessaires listées au tableau 9 (sauf variables pour I).	Repartir directement de la couche D_Infiltr. Y ajouter les variables nécessaires manquantes listées au tableau 9 (sauf variables pour I).	Tableau 9	Agréger, joindre un champ, ensemble de définition
Variables nécessaires	Le fichier shape est clippé pour correspondre à l'étendue de la zone d'étude.			Intersection
Ajustement zone d'étude	Retirer les zones ayant une vulnérabilité négligeable, c'est-à-dire les zones de subartésianisme / d'exfiltration (pas d'infiltration)			Supprimer
I	Les pertes et leurs bassins versants sont identifiés et cartographiés.	Les pertes sont identifiées. Leurs bassins versants sont calculés en se basant sur l'infiltrabilité des terrains.	Chapitre 4.3.2 Figure 6 Tableaux 1, 2	Ensemble de définition, zone tampon
I	Toutes les pertes et leurs bassins versants sont intégrés avec le reste des données. Selon la distance, un type d'écoulement est attribué : concentré (I _{p1}), semi-concentré (I _{p2}) ou semi-diffus (I _{p3}).		Chapitre 4.3.2 Tableau 3 Figure 6	Agréger, calculer un champ
I	Le type d'infiltration du reste du bassin d'alimentation du captage / de la source est classé comme diffus (I _{k4}) ou semi-diffus (I _{k3}) selon le ruissellement.		Chapitres 4.3.3 à 4.3.5 Tableaux 2, 3	Calculer un champ
P	Le nombre de points pour le paramètre P est calculé en combinant les variables en entrée (nature, épaisseur et perméabilité des terrains de couverture).		Chapitre 4.4 Tableau 4	Calculer un champ
E	Le nombre de points pour le paramètre E est calculé en combinant les variables en entrée (nature des terrains, épaisseur de la couverture, altération, délitage, lapiaz, doline).		Chapitre 4.5 Tableau 5	Calculer un champ
K	Le nombre de points pour le paramètre K est calculé en combinant les variables en entrée (zone non saturée, rivière souterraine, zone noyée ou essai de traçage).		Chapitre 4.6 Tableau 6	Calculer un champ
Points de protection totaux	Combiner les paramètres E, P, I avec le paramètre K pour obtenir le nombre de points de protection total.		Chapitre 4.7 Figure 9	Calculer un champ
Zone de protection	Attribuer la vulnérabilité et les types de zone de protection selon le nombre de points total obtenu.		Chapitre 4.8 Tableau 7	Calculer un champ

A8 Validation de la vulnérabilité par essai de traçage

A8-1 Principe

La vitesse de transit et le taux de restitution d'un traceur injecté à la surface du sol depuis un point donné du bassin d'alimentation d'un captage représente un analogue à un événement de pollution ponctuel dans l'espace et dans le temps. Si le traceur est conservatif, un tel essai permet donc en principe de mesurer la vulnérabilité intrinsèque face aux pollutions du cheminement entre le point d'injection et le captage. Pour être comparables, les essais de traçage doivent être réalisés dans des conditions similaires. C'est pourquoi une procédure standard a été définie.

A8-2 Procédure

- 1) Définir une surface d'infiltration, généralement de l'ordre de 25 m². En cas de forte pente, considérer le fait que le ruissellement pourrait emmener le traceur en aval du secteur.
- 2) Arroser le secteur avec des aspersionneurs, avec 50 à 100 mm d'eau pour saturer le sol (reproduction des conditions de moyennes à hautes eaux).
- 3) Injecter le traceur sur le sol en le mélangeant à l'eau d'arrosage.
- 4) Poursuivre l'arrosage sans traceur jusqu'à infiltration totale du traceur (50 à 100 mm supplémentaires sont généralement nécessaires).

On évitera un arrosage trop intense pour ne pas induire de ruissellement important qui conduirait le traceur trop en dehors du secteur à tester. Il est important d'utiliser des traceurs peu adsorbés dans le milieu. L'uranine, la diasyn yellow, l'éosine et le naphthionate sont les traceurs fluorescents remplissant le mieux cette condition. Le seuil de détection de ces traceurs étant très différent, la quantité à injecter sera ajustée en conséquence. Par exemple, pour un résultat comparable, il conviendra d'injecter environ deux fois plus de diasyn ou d'éosine que d'uranine et environ dix fois plus de naphthionate. Les rhodamines sont toutes assez fortement adsorbées dans les sols et sont donc déconseillées.

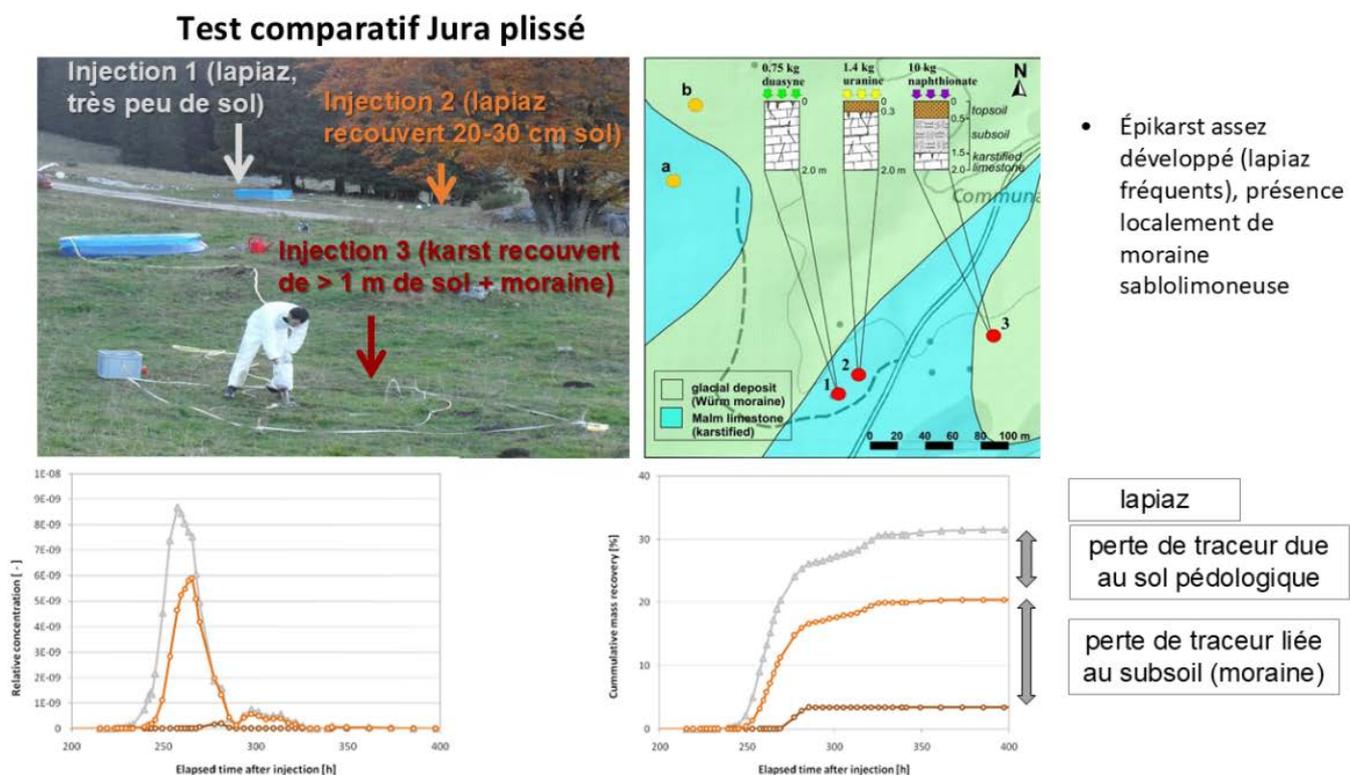
Un taux d'arrosage de ~20 mm par heure est recommandé. Il représente un compromis entre une durée d'injection praticable et un événement pluvieux encore réaliste.

A8-3 Exemple

Différents tests ont été opérés dans différents contextes. La figure 16 présente un exemple où trois traceurs ont été injectés sur des secteurs avec des couvertures de sol bien différentes. Le taux de restitution des traceurs est très différent, indiquant la nette atténuation produite par la traversée du sol et de l'épikarst.

Figure 16

Exemple d'essai de traçage standardisé avec différentes épaisseurs de sol (selon Sinreich & Pochon, 2015).



Référence clé

OFEG 2002. Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie. Guide pratique. Rapports de l'OFEG, série Géologie.