

L'environnement pratique

GUIDE PRATIQUE

**Délimitation des zones
de protection des eaux
souterraines en milieu
fissuré**



Office fédéral de
l'environnement,
des forêts et
du paysage
OFEFP

GUIDE PRATIQUE

Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré

Méthode des distances,
méthode des isochrones,
méthode DISCO

Con riassunto in italiano

**Publié par l'Office fédéral
de l'environnement, des forêts et du
paysage OFEFP et par l'Office fédéral
des eaux et de la géologie OFEG
Berne, 2003**

Valeur juridique de cette publication

La présente publication est une aide à l'exécution élaborée par l'OFEFP en tant qu'autorité de surveillance. Destinée en premier lieu aux autorités d'exécution, elle concrétise des notions juridiques indéterminées provenant de lois et d'ordonnances et permet ainsi une application uniforme de la législation. Les aides à l'exécution (appelées aussi directives, instructions, recommandations, manuels, aides pratiques) paraissent dans la collection « L'environnement pratique ».

Ces aides à l'exécution garantissent l'égalité devant la loi ainsi que la sécurité du droit, tout en favorisant la recherche de solutions adaptées aux cas particuliers. Si l'autorité en tient compte, elle peut partir du principe que ses décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions ne sont pas exclues; selon la jurisprudence, il faut cependant prouver leur conformité avec le droit en vigueur.

Editeurs

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)

Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG)

L'OFEFP et l'OFEG sont des offices du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)

Auteurs

Alain Pochon

François Zwahlen

Université de Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie (CHYN)

Rue Emile-Argand 11

2007 Neuchâtel

Référence

POCHON, A. & ZWAHLEN, F. 2003: Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré – Guide pratique. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne, 83 p.

Groupe d'experts

Jean-Pierre Tripet*, président

OFEG, Service géologique national

Nathalie Doerfliger*

BRGM, Service EAU, Montpellier, France

Benjamin Meylan

OFEFP, Division Protection des eaux et pêche

Philippe Renard*

EPFZ, Géologie de l'ingénieur

Gianni della Valle*

Hydrogéologue, Stettlen / BE

Andres Wildberger*

Dr. von Moos AG, Zürich

* Délégué/déléguée de la Société suisse d'hydrogéologie

Rédaction, mise en forme et réalisation

François Pasquier

Hydrogéologue-conseil, 2108 Couvet

Graphisme, mise en page

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Photo de couverture

Granite du Massif de l'Aar près du col du Grimsel (photo Beat Sigrist, OFEG)

Commande

OFEFP

Documentation

CH-3003 Berne

Fax + 41 (0) 31 324 02 16

E-Mail: docu@buwal.admin.ch

Internet: www.buwalshop.ch

Numéro de commande / prix:

VU-2505-F / gratuit

Cette publication existe aussi en allemand (VU-2505-D)

Achèvement du développement méthodologique: mars 2002

© OFEFP 2003 3.2004 800 09090/202

Table des matières

Abstracts	5		
Préface / Premessa	7		
Résumé	8		
Riassunto	10		
1 Introduction	13		
2 Caractéristiques des milieux fissurés	16		
2.1 Propriétés générales, schéma de fonctionnement simplifié	16		
2.2 Répartition et caractéristiques des aquifères fissurés en Suisse	16		
2.3 Principaux facteurs déterminant le fonctionnement des aquifères fissurés	18		
2.4 Exploitation et protection des ressources en eau potable	19		
3 Démarche méthodologique pour la délimitation des zones de protection	20		
3.1 Acquisition des données de base – Evaluation de la vulnérabilité du captage	20		
3.2 Acquisition de données complémentaires pour les captages vulnérables – Evaluation du degré d'hétérogénéité de l'aquifère	24		
4 Délimitation des zones de protection – Aquifères fissurés assimilables à des milieux continus équivalents	27		
4.1 Captages peu vulnérables (groupe a), méthode des distances	27		
4.2 Captages vulnérables, milieu faiblement hétérogène (cas b1), méthode des isochrones	28		
5 Délimitation des zones de protection – Aquifères fissurés fortement hétérogènes, méthode « DISCO » (cas b2)			
Captages vulnérables, milieu fortement hétérogène (cas b2), méthode de cartographie multicritère « DISCO »	30		
5.1 Domaine d'application	30		
5.2 Principes, modèle conceptuel	30		
5.3 Procédure	31		
		5.3.1 Etape 1: évaluation des paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice »	31
		5.3.2 Etape 2: calcul du facteur de protection intermédiaire F_{int}	32
		5.3.3 Etape 3: détermination du facteur de protection final F	33
		5.3.4 Etape 4: délimitation des zones de protection	33
		5.4 Ajustement et vérification de la méthode, recommandations	37
		6 Exemples d'application	39
		6.1 Sarreyer (VS) – Gneiss et schistes de la nappe de Siviez-Mischabel; Captage peu vulnérable (groupe a), méthode des distances	40
		6.2 Ronco sopra Ascona (TI) – Gneiss et amphibolites de la zone d'Ivrée; Captage vulnérable, milieu faiblement hétérogène (cas b1), méthode des isochrones	43
		6.3 Rieden (SG) – Conglomérats, grès et marnes de la Molasse subalpine; Captages vulnérables, milieu fortement hétérogène (cas b2), méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité « DISCO »	48
		6.4 Wyssberg (BE) – Grès et schistes du flysch de la nappe du Niesen; Captages vulnérables, milieu fortement hétérogène (cas b2), méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité « DISCO »	55
		6.5 Cas particuliers	62
		6.5.1 Aquifères fissurés fortement décomprimés et zones instables	62
		6.5.2 Aquifères mixtes (porosité de fissure et d'interstice)	65
		6.5.3 Infiltration de cours d'eau à proximité d'un captage	68
		7 Recommandations, aspects financiers	69
		7.1 Recommandations	69
		7.2 Aspects financiers	69
		8 Conclusions et perspectives	71
		9 Références bibliographiques	72

Annexes	74
1 Détermination de l'extension d'un bassin d'alimentation par calcul du bilan annuel	74
2 Caractérisation globale de la vulnérabilité du captage	76
3 Caractérisation des aquifères au moyen des hydrogrammes	78
4 Recommandations concernant les essais de traçage en milieu fissuré	80
5 Caractérisation des sols (sols au sens pédologique et roches meubles)	81
6 Essais d'infiltration (évaluation de la perméabilité de la couverture protectrice)	82

Abstracts

Delineating groundwater protection zones in fractured media

Under the Swiss Water Resources Protection Ordinance (Gewässerschutzverordnung – GSchV, SR 814.201) of October 28, 1998, the degree of vulnerability in the catchment area of springs and wells determines, in fractured media, the delineation of groundwater protection zones. The present practical guide explains the procedure for delineating such protection zones.

Due to the great diversity of geological and hydrogeological conditions prevailing in fractured media, it is not possible to delineate protection zones for such aquifers according to an uniform method. Consequently, the first step of the systematic methodological approach is to survey and evaluate basic data of the specific catchment facility (spring or well) and of the aquifer. The data such as discharge, physico-chemical parameters, turbidity and biology allow the vulnerability of the catchment facility to be evaluated. If vulnerability is low, protection zones can be defined with a minimum size (Distance Method). For vulnerable catchments, additional investigations need to be conducted in order to gain more precise information on the groundwater flow behaviour and degree of heterogeneity of the aquifer. If the degree of heterogeneity is found to be low, the protection zone is delineated by means of isochrones (Isochrone Method). The «DISCO» Method, a more complex multi-criteria method, is only applied if the aquifer is highly heterogeneous and the catchment is vulnerable.

Key words: Groundwater, joint aquifer, vulnerability, catchment area, mapping, groundwater protection zones, DISCO.

Ausscheidung von Grundwasserschutz-zonen bei Kluft-Grundwasserleitern

Gemäss Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV, SR 814.201) ist für die Dimensionierung der Grundwasserschutz-zonen bei Kluftgesteinsgrundwasser die Vulnerabilität im Einzugsgebiet der Fassungen massgebend. Die vorliegende Praxishilfe erläutert das Vorgehen für die Bemessung solcher Schutz-zonen.

Die grosse Vielfalt der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse bei Kluft-Grundwasserleitern lässt es nicht zu, die Schutz-zonen in diesen Gebieten nach einer einheitlichen Methode zu bemessen. Das systematische methodische Vorgehen beinhaltet daher in einem ersten Schritt die Erhebung und Auswertung von Basisdaten der Fassung und des Aquifers. Die Daten wie Schüttung, physikalisch-chemische Parameter, Trübung und Biologie ermöglichen es, Rückschlüsse auf die Vulnerabilität der Fassung zu ziehen. Bei gering vulnerablen Fassungen können die Schutz-zonen mit einer Mindestausdehnung ausgedehnt werden (Distanz-Methode). Für vulnerable Fassungen sind zusätzliche Untersuchungen durchzuführen, um genauere Informationen über das unterirdische Fliessverhalten und den Heterogenitätsgrad des Grundwasserleiters zu erhalten. Bei schwach heterogenen Grundwasserleitern werden die Schutz-zonen mittels Isochronen bemessen (Isochronen-Methode). Die aufwändigere Multikriterien-Methode «DISCO» gelangt nur bei einem stark heterogenen Grundwasserleiter und einer erhöhten Vulnerabilität der Fassung zur Anwendung.

Stichworte: Grundwasser, Kluft-Grundwasserleiter, Vulnerabilität, Einzugsgebiet, Kartierung, Grundwasserschutz-zonen, DISCO.

Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré

S'agissant des eaux souterraines en milieu fissuré, l'ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux, RS 814.201) retient que le dimensionnement des zones de protection est déterminé par la vulnérabilité du bassin d'alimentation du captage. Le présent guide pratique expose la procédure à suivre pour délimiter des zones de protection de ce type.

Les conditions géologiques et hydrogéologiques régnant dans les aquifères en milieu fissuré sont si diverses qu'il n'est pas possible d'appliquer une méthode unique. C'est pourquoi la démarche méthodologique systématique à mettre en œuvre prévoit une première étape consistant à recueillir et interpréter des données de base relatives au captage et à l'aquifère. Les données telles que débit, paramètres physico-chimiques, turbidité et caractéristiques biologiques permettent d'évaluer la vulnérabilité du captage. Si celui-ci s'avère peu sensible aux contaminations, on est en droit de délimiter des zones de protection d'extension minimale (méthode des distances). Un captage vulnérable requiert des investigations complémentaires destinées à mieux appréhender les écoulements souterrains et le degré d'hétérogénéité de l'aquifère. Si celui-ci est relativement homogène, les zones de protection sont délimitées en se basant sur les isochrones d'écoulement (méthode des isochrones). La méthode multicritère « DISCO », plus complexe, ne s'applique qu'aux aquifères très hétérogènes exploités par des captages vulnérables.

Mots clés: Eaux souterraines, aquifère en milieu fissuré, vulnérabilité des captages, bassin d'alimentation, cartographie, zones de protection, DISCO.

Delimitazione delle zone di protezione delle acque sotterranee in roccia fessurata

Secondo l'ordinanza del 28 ottobre 1998 sulla protezione delle acque (OPAc, RS 814.201), il dato fondamentale per la determinazione delle zone di protezione delle acque sotterranee in presenza di roccia fessurata è la vulnerabilità del bacino imbrifero delle captazioni. Il presente documento indica il procedimento da seguire per delimitare le suddette zone.

L'ampia varietà delle condizioni geologiche e idrogeologiche degli acquiferi in terreno fessurato non permette di determinare le zone di protezione basandosi su di un unico metodo. Il procedere metodologico sistematico da applicare consiste dunque in una prima tappa di raccolta e interpretazione dei dati relativi all'acquifero e alla captazione, come la sua portata, i parametri fisici e chimici, il grado di torbidità, e la sua biologia. Questi dati permettono di valutare la vulnerabilità della captazione. In presenza di captazioni solo lievemente vulnerabili, è possibile minimizzare l'estensione delle zone di protezione (metodo delle distanze). Al contrario, per le captazioni vulnerabili bisogna eseguire delle analisi supplementari, in modo da raccogliere più precise informazioni sul flusso sotterraneo e sul grado di eterogeneità dell'acquifero. Nel caso di un acquifero a bassa eterogeneità, le zone di protezione dovranno essere determinate tramite isocrone (metodo delle isocrone). Per ciò che riguarda gli acquiferi che presentano un alto livello di eterogeneità e una captazione vulnerabile, bisognerà ricorrere ad un metodo di analisi a più parametri e più complesso, cioè il metodo « DISCO ».

Parole chiave: falde acquifere sotterranee, acquifero in roccia fessurata, vulnerabilità, bacino imbrifero, rilievo cartografico, zone di protezione delle acque sotterranee, DISCO.

Préface

La loi du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux exige la délimitation de zones de protection des eaux souterraines afin de protéger contre la pollution les captages d'eau potable qui sont d'intérêt public. Dans les aquifères en roche meuble, le dimensionnement de ces zones est basé sur une durée d'écoulement donnée, qui correspond au temps nécessaire aux eaux souterraines pour arriver au captage.

Dans les aquifères fissurés, les vitesses d'écoulement des eaux souterraines sont parfois très hétérogènes. A priori, la méthode de dimensionnement des zones de protection basée sur des vitesses d'écoulement homogènes dans l'aquifère n'est donc pas systématiquement appropriée. L'ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux tient compte de cette situation et prévoit que dans les aquifères fissurés, le dimensionnement des zones de protection des eaux souterraines se base sur la vulnérabilité du bassin d'alimentation du captage.

Une méthode permettant d'évaluer dans la pratique cette vulnérabilité pour les aquifères fissurés est exposée dans le présent guide pratique. Cette méthode a pour but de dimensionner les zones de protection des eaux souterraines. Comme cela a déjà été fait pour les aquifères karstiques avec la publication intitulée « Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK) », le présent guide pratique a pour objectif d'uniformiser l'application des bases légales (voir imprimé) et d'apporter, à l'aide d'exemples concrets, les éclaircissements nécessaires à l'utilisation de la méthode. Il s'agit d'un document de recommandations qui s'adresse aux géologues et ingénieurs-conseil, ainsi qu'aux autorités spécialisées.

Ce guide pratique a été réalisé par le Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEPF). Un groupe de travail réunissant des membres de la Société suisse d'hydrogéologie (SSH) et associant l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) et l'OFEPF a encadré le projet.

*Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage*

Office fédéral des eaux et de la géologie

Premessa

La legge del 24 gennaio 1991 sulla protezione delle acque sancisce che le zone di protezione delle acque sotterranee devono essere dimensionate al fine di salvaguardare dall'inquinamento la captazione di acqua potabile d'interesse pubblico. Per le acque sotterranee in rocce incoerenti, il dimensionamento delle zone di protezione viene calcolato sulla base della durata del flusso che corrisponde al tempo impiegato dalle acque sotterranee per raggiungere il luogo di captazione.

Nelle falde acquifere in rocce fessurate, le velocità del flusso delle acque sotterranee sono distribuite a tratti in modo assai eterogeneo. A priori pertanto, il metodo di dimensionamento delle zone di protezione sulla base di velocità di flusso omogenee nell'aquifero non è in generale il più indicato. L'ordinanza del 28 ottobre 1998 sulla protezione delle acque tiene conto di tale fatto e sancisce che per le condotte delle acque sotterranee in rocce fessurate, il dimensionamento delle zone di protezione delle acque sotterranee sia determinato dalla vulnerabilità del bacino di alimentazione della captazione.

Tuttavia, la modalità che consente di definire la vulnerabilità del bacino di alimentazione della captazione in acquiferi in rocce fessurate, e pertanto, di dimensionare le zone per la protezione delle acque sotterranee non è ancora stata messa in pratica e necessita di alcune delucidazioni. La presente guida mira a fornire le necessarie spiegazioni tramite esempi concreti, così come è già avvenuto per le falde acquifere nelle regioni carsiche (« Cartografia della vulnerabilità nelle regioni carsiche – metodo EPIK ») – al fine di uniformare l'esecuzione (cfr. sigla editoriale). È rivolta ai geologi e agli ingegneri consulenti, e costituisce un ausilio per l'esecuzione per le autorità specializzate.

La presente guida è stata redatta dal « Centre d'hydrogéologie » dell'Università di Neuchâtel su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio (UFAPF). Il progetto è stato seguito da un gruppo di lavoro composto da membri della Società svizzera d'idrogeologia (SSI) in collaborazione con l'Ufficio federale delle acque e della geologia (UFAEG) e con l'UFAPF.

*Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste
e del paesaggio*

Ufficio federale delle acque e della geologia

Résumé

Les aquifères fissurés constituent une ressource en eau potable importante pour de nombreuses régions en Suisse. En raison des caractéristiques particulières de ces milieux et de la grande diversité des contextes hydrogéologiques rencontrés, il s'est avéré nécessaire de mettre au point une nouvelle démarche méthodologique permettant une délimitation des zones de protection pour l'ensemble des captages concernés. Il apparaît en effet que la méthode utilisée aujourd'hui, basée sur l'assimilation des aquifères fissurés à un milieu équivalent continu, n'est pas systématiquement applicable en raison de l'hétérogénéité du champ de perméabilité dans les roches fissurées. La méthode développée pour les milieux karstiques, EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998), n'est pas non plus applicable aux milieux fissurés non karstiques.

La démarche méthodologique présentée ici permet de choisir une procédure pour la délimitation des zones de protection des eaux souterraines (zones S), qui soit en accord avec le fonctionnement hydrogéologique des sites considérés. La démarche méthodologique et les procédures respectives ont été mises au point sur la base de l'observation de nombreux sites répartis sur l'ensemble du territoire suisse et situés dans des contextes géologiques et hydrogéologiques différents. Parmi ces sites, quatre sont présentés de manière résumée dans le cadre de ce guide pratique. Quelques autres sites sont évoqués succinctement pour illustrer des cas particuliers. Ces exemples d'application permettent d'illustrer et de justifier l'utilisation des trois différentes méthodes présentées ci-après.

La démarche se déroule de la manière suivante:

Acquisition des données de base:

- *caractérisation du contexte hydrogéologique, détermination des limites du bassin d'alimentation du captage,*
- *détermination des caractéristiques du captage,*
- *caractérisation globale de la vulnérabilité du captage (étude des fluctuations du débit, de la conductivité électrique de l'eau, de la température de l'eau en fonction des conditions météorologiques, analyses chimiques et bactériologiques).*

C'est ce dernier point qui est déterminant pour le choix de la méthode.

Au terme de cette première étape, il est possible de déterminer si le captage est naturellement bien protégé

vis-à-vis des impacts naturels ou anthropogènes sur le bassin d'alimentation (captage peu vulnérable aux pollutions \Rightarrow groupe a) ou si au contraire, il est sensible à ces impacts (captage vulnérable aux pollutions \Rightarrow groupe b).

Groupe a: captages peu vulnérables, milieux à circulations lentes

Ces captages sont caractérisés par une stabilité du débit, de la conductivité et de la température, même en période de fortes précipitations, et par une bonne qualité permanente de l'eau du point de vue de la biologie et de la turbidité, ainsi que par une stabilité des paramètres chimiques. Ces caractéristiques permettent de conclure à des vitesses d'écoulement lentes et à des temps de résidence élevés dans l'aquifère (ex.: milieu à perméabilité limitée; remontée d'eaux relativement profondes). Les eaux séjournent donc assez longtemps dans l'aquifère pour être épurées naturellement avant d'être captées.

Sur la base des données acquises lors de cette première étape, il est généralement possible de procéder directement à la délimitation des zones de protection.

Délimitation des zones S pour les captages du groupe a: méthode des distances

Dans cette situation, une délimitation de zones de protection d'extension minimale en considérant l'aquifère fissuré comme un milieu continu équivalent est généralement suffisante. On procédera donc, dans le cas de circulations lentes, selon le même principe qu'en milieu poreux. La distance entre les limites extérieures des zones S1 et S2 doit être au minimum de 100 mètres vers l'amont dans la direction générale des écoulements, et la distance entre les limites extérieures de S1 et S3 doit être au minimum 2 fois plus grande (si distance S1-S2 = 100m \Rightarrow distance S1-S3 = 200m).

Groupe b: captages vulnérables, milieux à circulations rapides

Ces captages sont caractérisés par une fluctuation marquée des débits, conductivités et températures lors des périodes de fortes précipitations, et/ou des problèmes de qualité de l'eau (biologie, turbidité). Ceci démontre la présence de connexions rapides entre le bassin d'alimentation et le captage (ex.: écoulements rapides le long de réseaux de fractures, contribution

d'apports liés à des infiltrations dans les environs immédiats du captage). Une partie des eaux ne séjourne pas assez longtemps dans l'aquifère pour être suffisamment filtrée et épurée naturellement avant d'être captée.

Une étude complémentaire est alors indispensable pour permettre de localiser les surfaces alimentant le captage par l'intermédiaire de circulations rapides et pour évaluer le degré d'hétérogénéité de l'aquifère.

Acquisition de données complémentaires:

- *étude des systèmes de discontinuité et évaluation de leur rôle hydrogéologique,*
- *recherche d'éventuelles zones d'infiltration préférentielle,*
- *suivi de la réponse de la source lors d'événements de crue,*
- *essais de traçage.*

Au terme de cette étude complémentaire, l'origine des contributions rapides et le degré d'hétérogénéité de l'aquifère est précisé (faible ou fort). Une méthode adéquate de délimitation des zones de protection est alors choisie selon les deux cas de figure possibles (cas b1 et b2):

Cas b1: milieu faiblement hétérogène à l'échelle du bassin d'alimentation du captage

Dans ce cas, les temps de transit augmentent globalement à mesure que l'on s'éloigne du captage. La délimitation de zones de protection sur la base de l'assimilation de l'aquifère à un milieu équivalent continu peut donc être admise, bien que le milieu reste le plus souvent hétérogène à l'échelle du mètre ou de la dizaine de mètres.

Délimitation des zones S pour les captages du cas b1: méthode des isochrones

On procède à la délimitation des zones de protection selon le même principe qu'en milieu poreux:

- évaluation des vitesses de transit maximum dans l'aquifère et délimitation de l'isochrone des 10 jours pour la limite de la zone S2 (au minimum 100 m vers l'amont),
- la zone S3 doit ensuite être fixée de telle manière à ce que la distance entre les limites extérieures de S2 et S3 soit au minimum égale à la distance entre les limites extérieures de S1 et S2.

Cas b2: milieu fortement hétérogène à l'échelle du bassin d'alimentation du captage

Les eaux circulent le long d'un réseau de fissures localement très perméables avec des liaisons rapides (quelques heures à quelques jours) entre le captage et des zones réparties sur l'ensemble du bassin d'alimentation.

Dans ce cas, les temps de transit n'augmentent pas forcément à mesure que l'on s'éloigne du captage. Une assimilation de l'aquifère à un milieu continu équivalent n'est donc pas acceptable. Seule une approche multicritère de la vulnérabilité sur l'ensemble du bassin d'alimentation permet de délimiter les zones de protection en prenant en considération la forte hétérogénéité du milieu.

Délimitation des zones S pour les captages du cas b2: méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité « DISCO »

Cette méthode est basée sur la prise en considération des facteurs géologiques et hydrogéologiques déterminant le fonctionnement de l'aquifère fissuré.

L'évaluation de deux ou trois paramètres (**DIS**continuités, **CO**uverture protectrice, et le cas échéant ruissellement) permet de caractériser le transport d'un polluant d'un point quelconque du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage.

La cartographie, la combinaison et la pondération de ces paramètres permet de déterminer un facteur de protection naturel F en tout point du bassin d'alimentation du captage. La délimitation des zones S est ensuite réalisée par l'intermédiaire d'une relation d'équivalence entre le facteur F et les zones S1, S2 et S3:

- S1: zones caractérisées par un facteur de protection naturel nul ou très faible (vulnérabilité particulièrement forte),
- S2: zones caractérisées par un facteur de protection naturel faible (vulnérabilité forte),
- S3: zones caractérisées par un facteur de protection naturel moyen (vulnérabilité moyenne).

Riassunto

Gli acquiferi fessurati costituiscono un'importante risorsa d'acqua potabile per molte regioni svizzere. Viste le particolari caratteristiche di questi ambienti e la grande diversità dei contesti idrogeologici rilevati, si è dovuto mettere a punto un nuovo metodo che consentisse di delimitare le zone di protezione per tutte le captazioni interessate. Infatti, il metodo usato attualmente, fondato sull'assimilazione degli acquiferi fessurati a un ambiente equivalente continuo, non è applicabile sistematicamente a causa dell'eterogeneità del campo di permeabilità nelle rocce fessurate. Nemmeno il metodo sviluppato per gli ambienti carsici, EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998), può essere usato per gli ambienti fessurati non carsici.

Il metodo illustrato qui appresso permette di scegliere una procedura per la delimitazione delle zone di protezione delle acque sotterranee (zone S) che sia compatibile con il funzionamento idrogeologico dei siti analizzati. Il metodo e le diverse procedure sono stati messi a punto in base all'osservazione di numerosi siti sparsi in tutto il territorio svizzero in contesti geologici e idrogeologici differenti. Quattro di questi siti sono presentati in modo riassuntivo nella presente guida pratica. Qualche altro è citato brevemente al fine di illustrare dei casi particolari. Gli esempi d'applicazione consentono di presentare e giustificare l'uso dei tre diversi metodi sottomenzionati.

Il metodo comprende le fasi seguenti:

Rilevamento dei dati di base:

- *caratterizzazione del contesto idrogeologico, determinazione dei limiti del bacino d'alimentazione della captazione,*
- *determinazione delle caratteristiche della captazione,*
- *caratterizzazione globale della vulnerabilità della captazione (analisi delle fluttuazioni della portata, della conduttività elettrica dell'acqua, della temperatura dell'acqua in funzione delle condizioni meteorologiche, analisi chimiche e batteriologiche).*

Questo ultimo punto è determinante per la scelta del metodo.

Al termine di questa prima fase, è possibile stabilire se la captazione è naturalmente ben protetta dagli impatti naturali o antropogeni sul bacino d'alimentazione (*captazione poco vulnerabile all'inquinamento* ⇒ gruppo a)

o se invece è sensibile agli impatti (*captazione vulnerabile all'inquinamento* ⇒ gruppo b).

Gruppo a: captazioni poco vulnerabili, ambienti con circolazioni lente

Queste captazioni si contraddistinguono per la stabilità della portata, della conduttività e della temperatura anche durante i periodi di forti precipitazioni e per la buona qualità costante dell'acqua dal punto di vista biologico e della torbidezza, come per una stabilità dei parametri chimici. Tali caratteristiche lasciano presupporre che la velocità di deflusso sia bassa e che i tempi di residenza nell'acquifero siano elevati (p.es.: ambienti con permeabilità limitata; risalita di acque relativamente profonde). Le acque rimangono quindi abbastanza a lungo nell'acquifero, tanto da poter essere depurate naturalmente prima della captazione.

Sulla base dei dati rilevati durante la prima fase, è in via di massima possibile delimitare direttamente le zone di protezione.

Delimitazione delle zone S per le captazioni del gruppo a: metodo delle distanze

In questo contesto, è in genere sufficiente una delimitazione delle zone di protezione con un'estensione minima che considera l'acquifero fessurato un ambiente continuo equivalente. Se le circolazioni sono lente, si procede pertanto secondo lo stesso principio applicato per gli ambienti porosi. Tra i limiti esterni delle zone S1 e S2 ci dev'essere una distanza minima di 100 metri verso monte nella direzione generale dei deflussi, e la distanza tra i limiti esterni di S1 e S3 dev'essere almeno due volte più grande (se la distanza S1-S2 = 100m ⇒ distanza S1-S3 = 200m).

Gruppo b: captazioni vulnerabili, ambienti con circolazioni rapide

Queste captazioni si contraddistinguono per la fluttuazione marcata della portata, della conduttività e della temperatura durante i periodi di forti precipitazioni e/o per i problemi della qualità dell'acqua (biologia, torbidezza). Ciò conferma la presenza di collegamenti rapidi tra il bacino d'alimentazione e la captazione (p.es.: deflussi rapidi lungo le reti di fratture, apporti dovuti a infiltrazioni nei pressi della captazione). Una parte delle

acque non rimane abbastanza a lungo nell'acquifero per essere filtrata a sufficienza e depurata in modo naturale prima della captazione.

Un'analisi complementare si rende dunque necessaria al fine di localizzare le zone che alimentano la captazione tramite circolazioni rapide e per valutare il grado di eterogeneità dell'acquifero.

Rilevamento dei dati complementari:

- *analisi dei sistemi di discontinuità e valutazione della loro funzione idrogeologica,*
- *ricerca di eventuali zone di infiltrazione preferenziale,*
- *controllo della reazione della fonte durante gli eventi di piena,*
- *prova di tracciatura.*

L'analisi permette di precisare l'origine degli apporti rapidi e il grado di eterogeneità dell'acquifero (debole o forte). Si sceglie un metodo adeguato per delimitare le zone di protezione in base alle due opzioni possibili (casi b1 e b2).

Caso b1: ambiente debolmente eterogeneo a livello del bacino d'alimentazione della captazione

In questo caso, i tempi di transito aumentano globalmente man mano che ci si allontana dalla captazione. La delimitazione delle zone di protezione assimilando l'acquifero a un ambiente equivalente continuo può pertanto essere ammessa, anche se l'ambiente rimane solitamente eterogeneo a livello di un metro o di una decina di metri.

Delimitazione delle zone S per le captazioni del caso b1: metodo delle isocrone

Le zone di protezione vengono delimitate secondo lo stesso principio applicato per gli ambienti porosi:

- *valutazione delle velocità di transito massimo nell'acquifero e delimitazione dell'isocrona di 10 giorni per il limite della zona S2 (almeno 100 m a monte dell'impianto di captazione),*
- *la zona S3 deve successivamente essere determinata in modo tale che la distanza tra i limiti esterni di S2 e S3 sia uguale almeno alla distanza che separa i limiti esterni di S1 e S2.*

Caso b2: ambiente fortemente eterogeneo a livello del bacino d'alimentazione della captazione

Le acque circolano lungo una rete di fessure localmente molto permeabili con raccordi rapidi (da qualche ora a qualche giorno) tra la captazione e le zone sparse sull'insieme del bacino d'alimentazione.

In questo caso, i tempi di transito non aumentano necessariamente man mano che ci si allontana dalla captazione. L'assimilazione dell'acquifero a un ambiente continuo equivalente non è dunque ammessa. Solo uno studio secondo diversi criteri della vulnerabilità sull'insieme del bacino d'alimentazione permette di delimitare le zone di protezione tenendo conto della forte eterogeneità dell'ambiente.

Delimitazione delle zone S per le captazioni del caso b2: metodo di cartografia della vulnerabilità a criteri multipli « DISCO »

Questo metodo considera i fattori geologici e idrogeologici che determinano il funzionamento dell'acquifero fessurato.

La valutazione di due o tre parametri (**DIS**continuità, **CO**pertura di protezione, e se del caso, ruscellamento) permette di caratterizzare il trasporto di un agente inquinante da un punto qualsiasi del bacino d'alimentazione fino all'arrivo alla captazione.

La cartografia, l'abbinamento e la ponderazione di questi parametri permettono di determinare un fattore di protezione naturale F per ogni punto del bacino d'alimentazione della captazione. Le zone S sono in seguito delimitate tramite una relazione d'equivalenza tra il fattore F e le zone S1, S2 e S3.

- **S1:** zone con un fattore di protezione naturale o molto debole (vulnerabilità particolarmente forte),
- **S2:** zone con un fattore di protezione naturale debole (vulnerabilità forte),
- **S3:** zone con un fattore di protezione naturale medio (vulnerabilità media).

1 Introduction

Les aquifères fissurés jouent un rôle important en Suisse pour l'approvisionnement en eau de la population résidant en dehors des grands centres urbains. Une grande partie de l'eau potable provient de ces aquifères dans les régions alpines et de nombreuses sources sont également captées le long des reliefs du Plateau suisse. Si les débits exploités par captage sont en règle générale plus faibles (le plus souvent inférieurs à 1000 l/min) qu'en milieu karstique ou en milieu poreux, le nombre d'ouvrages devant faire l'objet de délimitation de zones de protection est élevé.

La méthode EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998) développée pour la délimitation des zones de protection en milieu karstique n'est pas applicable aux milieux fissurés non karstiques et n'est donc pas prise en considération dans le cadre du présent guide. Le comportement des aquifères fissurés varie fortement d'un site à l'autre, notamment en fonction du contexte géologique (type de roche, tectonique) et de la topographie. Cela implique des contrastes au niveau de la structure de l'aquifère (ex.: répartition des perméabilités, hétérogénéité, anisotropie) et de l'organisation des écoulements (ex.: circulations plus ou moins profondes, vitesses de transit, temps de résidence).

Vulnérabilité des eaux souterraines

Le terme de vulnérabilité intrinsèque est utilisé pour caractériser de manière globale la sensibilité des eaux souterraines aux contaminations. Il prend en considération les caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu naturel mais est indépendant de la nature du polluant (d'après Daly et al. 2002).

Dans le cas de la délimitation des zones de protection, la cartographie de la vulnérabilité a pour but d'évaluer en tout point du bassin d'alimentation l'impact d'une pollution potentielle sur la qualité de l'eau du captage.

Dans le cadre de la délimitation des zones de protection, des observations concernant la réponse hydrologique du captage sont indispensables et permettent dans un premier temps de caractériser la vulnérabilité du captage.

Un captage est considéré comme peu vulnérable si les eaux souterraines séjournent assez longtemps dans l'aquifère pour être filtrées et épurées de manière naturelle avant d'être captées. Dans un tel cas, quelles que soient les conditions hydrologiques, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau varient très peu, et les problèmes de qualité de l'eau (biologie, turbidité) sont absents. Le débit, lui aussi, varie peu, sauf dans le cas d'un effet piston. Dans ce type de contexte, les essais de traçage ne constituent généralement pas un outil adéquat (absence de restitution) en raison de vitesses de transfert lentes dans l'aquifère et/ou de circulations liées à des systèmes d'écoulement relativement profonds. Dans de tels contextes une approche simple, ne nécessitant pas une étude détaillée de la structure et de l'hétérogénéité de l'aquifère, est généralement suffisante pour délimiter les zones de protection S et garantir la bonne qualité de l'eau captée.

Un captage est considéré comme vulnérable dans le cas où une proportion significative des eaux captées est liée à des circulations rapides et à des temps de résidence courts dans l'aquifère. Une partie des eaux s'infiltrant dans le bassin d'alimentation ne séjourne pas suffisamment longtemps dans l'aquifère pour être filtrée et épurée de manière naturelle avant d'être captée.

Dans de tels contextes, les zones de protection doivent donc être définies avec un soin particulier pour assurer la qualité de l'eau captée. La structure et le degré d'hétérogénéité de l'aquifère (figure 1) doivent impérativement être évalués et pris en compte dans le cadre de la définition des zones de protection.

Ces observations impliquent que des méthodes différentes doivent être utilisées pour délimiter les zones de protection selon les cas. Elles montrent la nécessité d'obtenir dans un premier temps des données suffisantes pour caractériser le comportement et la vulnérabilité du captage et dans un deuxième temps, pour les captages vulnérables, d'obtenir suffisamment de données concernant la structure de l'aquifère et l'organisation des écoulements.

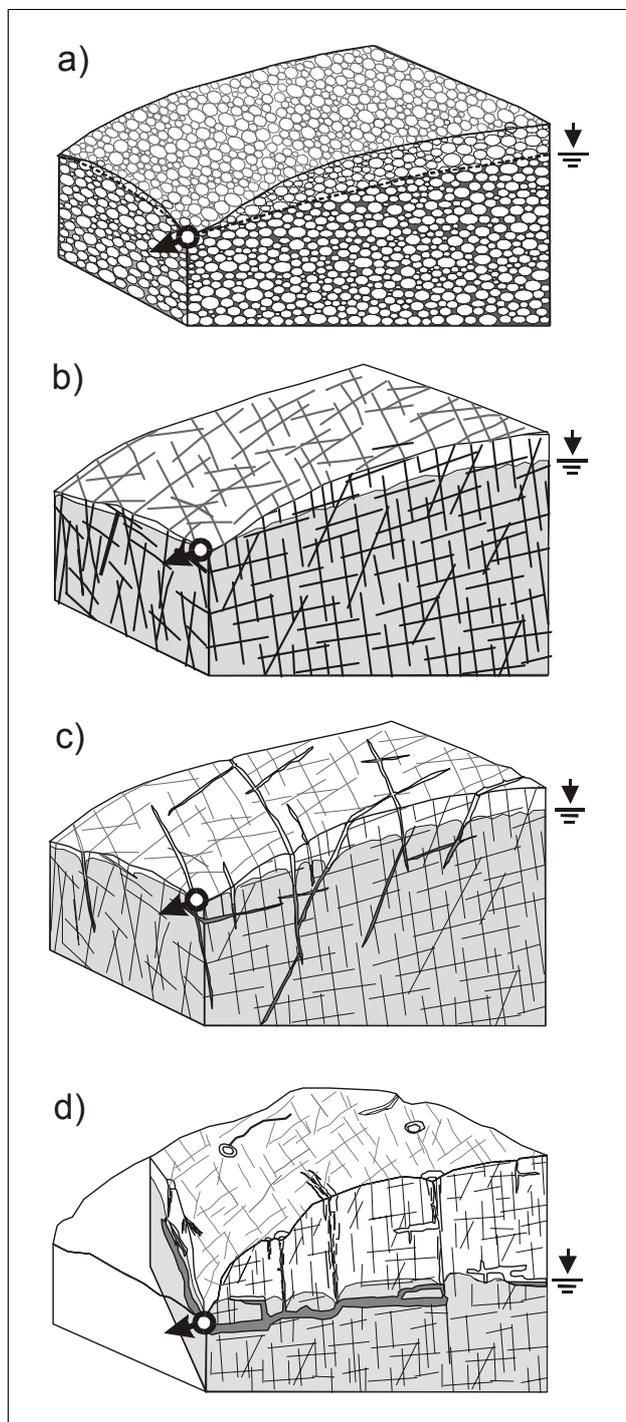


Figure 1: Représentation schématique de quatre aquifères caractérisés par une hétérogénéité croissante
 a) milieu poreux homogène
 b) milieu fissuré faiblement hétérogène
 c) milieu fissuré hétérogène
 d) milieu karstique.

Les zones de protection doivent permettre de garantir les objectifs de prévention (voir encadré)

Zones de protection des eaux souterraines

Zone S1: elle doit permettre d'éviter les dégâts aux installations de captage ou d'alimentation artificielle des eaux souterraines, ainsi que les pollutions dans leur environnement immédiat. En milieu fissuré, elle couvre encore d'autres zones, si ces dernières présentent une vulnérabilité particulièrement forte (p.ex. zones tectonisées) ou si l'existence d'une liaison directe entre ces zones et le captage est prouvée ou doit être présumée.

Zone S2: elle a pour rôle de tenir à l'écart du captage les contaminations microbiologiques, elle doit également permettre d'éviter que l'eau captée soit polluée par des excavations et des travaux souterrains, et que l'écoulement des eaux souterraines vers le captage soit perturbé par des ouvrages souterrains.

Zone S3: elle doit permettre de garantir suffisamment d'espace et de temps pour des mesures d'assainissement, dans le cas où une source de pollution menacerait de contaminer les eaux souterraines, p.ex. lors d'un accident mettant en cause des substances de nature à polluer les eaux.

Une démarche méthodologique a été développée par le Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel en collaboration avec un groupe d'experts de la Société suisse d'hydrogéologie et des services spécialisés de la Confédération. Elle comprend d'une part un inventaire des observations nécessaires pour caractériser le fonctionnement des aquifères fissurés et d'autre part une description des méthodes permettant la délimitation des zones de protection dans les différents cas de figure possibles. Elle fait l'objet du présent guide pratique. La présente démarche s'applique en principe aux captages de sources. Elle n'est en général pas applicable aux captages par forage ou galerie profonde, cas relativement peu fréquents en Suisse et relevant de circulations régionales de l'eau souterraine. Un exemple est décrit dans le chapitre 6.5.2 a.

La démarche méthodologique et les différentes procédures permettant la délimitation des zones de protec-

tion ont été mises au point sur la base de l'observation de nombreux sites répartis sur l'ensemble du territoire suisse et situés dans des contextes géologiques et hydrogéologiques différents. Parmi ces sites, quatre sont présentés de manière résumée dans le chapitre 6. Quelques autres sites sont évoqués succinctement pour illustrer des cas particuliers.

La législation en matière de protection des eaux – loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (RS 814.20) – exige, dans l'article 20, la délimitation des zones de protection pour tous captages (sources, galeries, puits) et installations d'alimentation artificielle des eaux souterraines qui sont d'intérêt public (Définition: voir Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines, OFEFP 2004). L'application de la loi incombe aux cantons, sur la base des ordonnances

et directives fédérales. Les restrictions les plus importantes dans ces zones sont la limitation des constructions industrielles et l'interdiction d'extraction des matériaux. L'ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux, RS 814.201) préconise trois zones de protection. Ces zones appelées S1, S2 et S3 font l'objet d'un règlement relatif à l'utilisation du territoire.

Pour les eaux souterraines en milieu fissuré, le dimensionnement des zones de protection est basé d'après l'OEaux sur la vulnérabilité du bassin d'alimentation du captage. Cette vulnérabilité est établie selon les critères suivants: caractéristiques des roches proches de la surface, telles que zone de décompression, propriétés des couches de couverture, conditions d'infiltration et caractéristiques des systèmes de discontinuité.

2 Caractéristiques des milieux fissurés

2.1 Propriétés générales, schéma de fonctionnement simplifié

Dans les aquifères à porosité de fissure, l'écoulement des eaux souterraines s'effectue de manière prépondérante le long des fractures, diaclases, failles, voire limites de bancs.

Les observations effectuées en galerie et dans les forages mettent en évidence une alternance de secteurs peu perméables où les écoulements sont peu abondants et de zones fracturées de façon plus intense, plus fortement perméables où sont localisées les principales venues d'eau (Jamier 1975; Dubois 1991; Maréchal 1998).

Le modèle conceptuel suivant est proposé pour décrire le fonctionnement des aquifères fissurés (figure 2):

- présence d'un réseau de discontinuités principales caractérisées par des perméabilités élevées. Ces discontinuités ont une fonction essentiellement conductrice. Elles servent de drain et alimentent les principales zones d'exutoire,
- le reste du massif est considéré comme relativement homogène. Il est caractérisé par une porosité d'interstice (ex.: grès) ou de fissure, se traduisant par une perméabilité nettement plus faible que le réseau de discontinuités principales. Ces volumes de roches peu perméables correspondent donc à la fonction capacitive de l'aquifère,
- la recharge de l'aquifère s'effectue aussi bien au niveau des discontinuités principales qu'au niveau des volumes de roches moins perméables,
- l'eau captée dans la zone d'exutoire est un mélange d'eau jeune (contribution liée à une alimentation directe du réseau de structures perméables connectées avec le captage) et d'eau plus ancienne (contribution liée à une alimentation de zones moins perméables lentement drainées par les discontinuités principales).

Le fonctionnement hydrogéologique varie cependant fortement d'un site à l'autre (systèmes d'écoulement plus ou moins profonds, hétérogénéité plus ou moins marquée à l'échelle du bassin d'alimentation du captage). De plus, en milieu fissuré, les phénomènes de

décompression peuvent engendrer une augmentation de l'ouverture des fractures qui induit un accroissement de la perméabilité de l'aquifère à proximité de la surface (Avias 1982, Cruchet 1985). L'importance de ces phénomènes et l'épaisseur de la zone de décompression varient également fortement d'un site à l'autre.

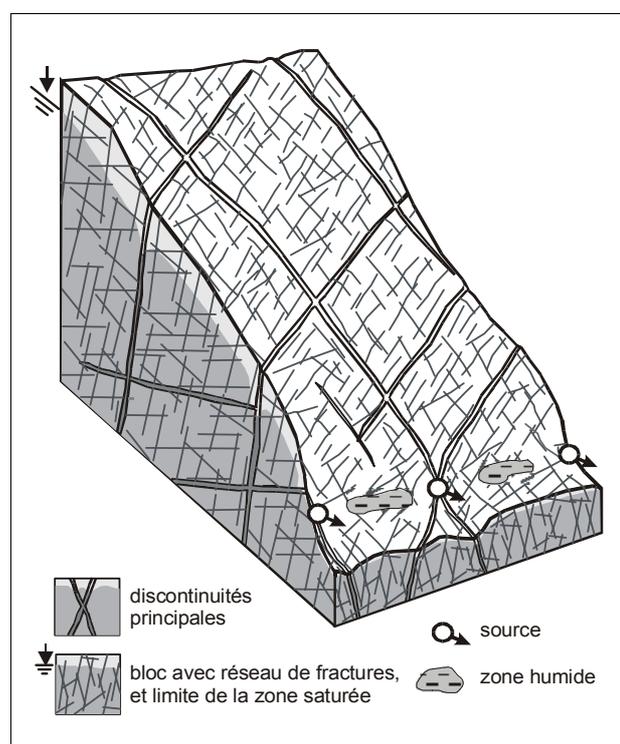


Figure 2: Schéma conceptuel d'un aquifère fissuré. La couverture (sol, moraine) n'est pas représentée.

2.2 Répartition et caractéristiques des aquifères fissurés en Suisse

On dénombre en Suisse divers types de roches cohérentes situées dans des contextes tectoniques différents. La quasi-totalité des aquifères fissurés exploités en Suisse se trouve dans des régions accidentées (Alpes, Préalpes, reliefs du Plateau); dans les régions de plaine et les plus grandes vallées, des dépôts quaternaires importants (présence de formations aquifères à porosité d'interstice) recouvrent le plus souvent les formations fissurées.

Il est utile de regrouper les aquifères fissurés selon leurs caractéristiques lithologiques et structurales. Les aquifères karstiques ne sont pas pris en considération ici, puisqu'une méthode spécifique (EPIK) a été développée pour la délimitation des zones de protection dans ces milieux (Doerfliger & Zwahlen 1998).

En Suisse, l'importance considérable des dépôts quaternaires se traduit souvent par la présence de captages alimentés simultanément par un aquifère fissuré et par un aquifère quaternaire (moraines, dépôts de pente).

Les classes suivantes sont proposées:

Roches sédimentaires détritiques consolidées faiblement tectonisées (Molasse du Plateau et des synclinaux du Jura)

Il s'agit d'alternances de grès, conglomérats et marnes peu fracturés (figure 3 et chapitre 6, figure 16, classe 2). La perméabilité de fissure est généralement faible, mais on observe localement des écoulements assez abondants le long de fractures ou de limites de bancs. Les réservoirs alimentant ces discontinuités sont cependant le plus souvent des aquifères à porosité d'interstice (porosité primaire des grès, couches superficielles altérées ou décalcifiées, dépôts quaternaires superficiels).



Figure 3: Roches sédimentaires, Molasse du Plateau: Molasse marine supérieure à Moudon. Les couches poreuses sont peu fissurées, avec écoulements le long de limites de bancs. (Photo F. Pasquier)

Roches sédimentaires consolidées tectonisées (Molasse subalpine, Flysch, Verrucano, Schistes lustrés et Bündnerschiefer, en partie Calcaires siliceux helvétiques ainsi que dolomies austroalpines et sudalpines)

Cette classe comprend des types de roches variés: grès, conglomérats, marnes, schistes, calcschistes, calcaires siliceux et dolomies non karstiques. Dans cette catégorie, l'effet de la tectonique alpine est fortement marqué et se traduit par la présence de bancs redressés, voire plissés et intensément fracturés (figure 4 et chapitre 6, figure 16, classe 3). Les phénomènes de dissolution ou d'érosion sont significatifs le long des discontinuités et impliquent une augmentation de la porosité de fissure et de la perméabilité. La porosité d'interstice des roches est par contre moins élevée que pour la Molasse du Plateau en raison d'un degré de compaction et de cimentation plus élevé (Keller 1992).



Figure 4: Roches sédimentaires, Molasse subalpine: Grès de Vaulruz à Vaulruz. Les couches sont redressées, compactées et fracturées. (Photo F. Pasquier)

Les vitesses d'écoulement des eaux souterraines sont en général rapides, ceci notamment en raison des forts reliefs (gradients hydrauliques élevés) rencontrés dans les régions préalpines et alpines. Dans ce type de contexte, l'instabilité des masses rocheuses se traduit par la présence de nombreux glissements, tassements et parfois par des dépôts de pente d'épaisseur considérable. L'influence de ces facteurs, additionnée parfois à celle de dépôts quaternaires fluvio-glaciaires implique souvent un fonctionnement hydrogéologique complexe (aquifères mixtes).



Figure 5:
Roches métamorphiques: amphibolites et paragneiss au glacier du Rhône. On voit l'aspect compact de la roche et les discontinuités subverticales.
(Photo B. Sigrist)

Roches cristallines (roches magmatiques et métamorphiques) et roches sédimentaires fortement consolidées (Permo-carbonifère des nappes penniques)

Cette classe comprend des types lithologiques très différents: granites, gneiss, schistes, roches vertes, ainsi que conglomérats et grès (figure 5 et chapitre 6, figure 16, classe 4). Toutes ces roches sont situées dans des contextes où la déformation alpine est intense. Elles sont bien cristallisées ou fortement consolidées. Leur porosité de matrice est négligeable, et les phénomènes de dissolution ou d'érosion le long des fissures sont en général peu marqués. Les caractéristiques des réseaux de fissures (distribution, ouverture) sont donc essentiellement liées à la tectonique et à la force gravitationnelle (appel au vide, décompression, fauchage). Les problèmes de qualité de l'eau sont moins marqués que dans la classe précédente, mais des apports rapides d'eau de mauvaise qualité en direction des captages sont possibles par l'intermédiaire de zones fortement fracturées, particulièrement dans le cas de relations eaux de surface – aquifère (mise en charge de certaines fractures).

2.3 Principaux facteurs déterminant le fonctionnement des aquifères fissurés

L'observation de sites appartenant à ces trois classes d'aquifères permet de mettre en évidence les princi-

aux facteurs contrôlant le fonctionnement hydrogéologique des aquifères fissurés:

Lithologie

- présence ou non de plans de stratification ou de schistosité
(⇒ écoulements le long des limites de bancs),
- présence ou non d'une porosité de matrice
(⇒ milieu à double porosité),
- plus ou moins forte teneur en minéraux solubles ou oxydables, plus ou moins forte consolidation de la roche (⇒ augmentation possible de l'ouverture des discontinuités par dissolution ou érosion),
- type de comportement mécanique de la roche: rigide et cassant, ou plastique (⇒ fracturation plus ou moins développée pour des types de roches différents sous un même régime tectonique).

Tectonique

- contexte tectonique (⇒ intensité de la déformation, distribution des discontinuités, déformation ductile/cassante).

Relief

- distribution des potentiels hydrauliques dans l'aquifère. Dans les zones fortement accidentées, on observe des gradients particulièrement élevés impliquant généralement des vitesses de transit rapides,
- phénomènes de dissolution ou d'érosion mécanique. Dans les régions caractérisées par de forts gradients

hydrauliques, ces phénomènes peuvent conduire à une augmentation des perméabilités le long des fissures, particulièrement dans la direction des gradients les plus élevés,

- fauchage et ouverture des réseaux de fractures dus aux forces gravitaires. Ces instabilités peuvent provoquer une augmentation des perméabilités dans les premières dizaines de mètres à partir de la surface, voire parfois quelques centaines de mètres.

D'autres paramètres influencent également le fonctionnement des aquifères fissurés:

Influence des glaciations

- présence de dépôts fluvi-glaciaires (formations quaternaires aquifères ou peu perméables superposées au milieu fissuré),
- exfoliation (⇒ ouverture de discontinuités due à la décompression post-glaciaire).

Relations avec les eaux de surface

- alimentation directe de certaines fissures et possibilité de mise en charge
(⇒ connexions rapides avec le captage possibles).

2.4 Exploitation et protection des ressources en eau potable

Types de captage

L'exploitation des aquifères fissurés en Suisse concerne essentiellement les reliefs du Plateau suisse, les Préalpes, et les Alpes. Les eaux y sont captées soit par des ouvrages réalisés dans des zones d'exutoire naturel soit par l'intermédiaire de galeries (Molasse du Plateau) soit exceptionnellement par des forages (quelques puits profonds exploitent les eaux de la Molasse marine supérieure).

Dans le cadre de ce guide méthodologique, l'accent a été mis sur la protection des sources et des galeries. Les aspects particuliers de la délimitation des zones de protection des forages ne sont pas abordés spécifiquement, puisque les forages exploitant les milieux fissurés non karstiques en Suisse captent des eaux profondes à temps de transit généralement longs (souvent supérieurs à plusieurs dizaines d'années).

Risques de pollution et problèmes de qualité

La majorité des aquifères fissurés exploités sont situés dans des régions accidentées (Alpes, Préalpes). Les risques de pollution menaçant la qualité des eaux souterraines sont donc essentiellement liés à l'élevage et l'agriculture de montagne (bétail, fosses à purin, épandage de fumure) et au tourisme (fosses septiques, puits perdus). De manière générale ce sont les pollutions biologiques qui posent le plus souvent des problèmes, mais l'infiltration d'autres substances comme p.ex. les hydrocarbures (véhicules, chauffage, travaux, transport) représente également un facteur de risque important. Dans les zones faiblement accidentées situées à basse altitude (Plateau, et premiers contreforts des Préalpes), les substances utilisées par l'agriculture intensive (engrais, pesticides) voire par l'industrie peuvent représenter un danger supplémentaire.

Caractérisation des aquifères et délimitation des zones de protection

Pour les captages de sources ou les galeries, il n'est pas possible d'évaluer les caractéristiques des aquifères (perméabilité, coefficient d'emmagasinement) par l'intermédiaire d'essais de pompage. Une connaissance suffisante de l'aquifère est cependant nécessaire pour protéger efficacement les ressources en eau des milieux fissurés. C'est pourquoi il est indispensable d'étudier le comportement hydrologique du captage (suivi du débit et des paramètres physico-chimiques). On peut ainsi comprendre le fonctionnement global de l'aquifère. Il faut en outre acquérir des données géologiques suffisantes (lithologie, fracturation) pour évaluer la structure de l'aquifère.

L'étude de nombreux sites a montré l'existence de fonctionnements hydrogéologiques très différents d'un aquifère à l'autre. Il n'est donc pas possible de proposer une seule méthode pour délimiter valablement les zones de protection pour l'ensemble des aquifères fissurés en Suisse.

Une approche en plusieurs étapes, permettant de choisir la méthode adéquate sur la base d'une connaissance suffisante du fonctionnement hydrogéologique du site étudié est présentée au chapitre suivant.

3 Démarche méthodologique pour la délimitation des zones de protection

La démarche méthodologique présentée, développée grâce à l'étude de sites de test (voir chapitre 6), permet la délimitation des zones de protection en milieu fissuré, quel que soit le contexte hydrogéologique rencontré. Elle se déroule en deux ou trois étapes, selon la complexité du cas à traiter (figure 7):

- acquisition des données de base (définition du contexte hydrogéologique, des limites du bassin d'alimentation, des risques de pollution et de la vulnérabilité du captage),
- le cas échéant (pour les captages vulnérables) acquisition de données complémentaires (traçages, évaluation de l'hétérogénéité de l'aquifère),
- délimitation des zones de protection S selon la méthode appropriée.

Les limites hydrogéologiques ainsi obtenues pour les zones S seront ensuite adaptées en tenant compte p.ex. de la répartition parcellaire.

3.1 Acquisition des données de base – Evaluation de la vulnérabilité du captage

Sur la base de données existantes et d'informations complémentaires, les points suivants doivent être traités:

Description de la situation, du type et de l'état du captage

- la situation de l'ouvrage (figure 6) doit être décrite (p.ex. directement au pied d'un affleurement de roches fissurées, dans une zone avec présence d'éboulis ou de moraine, près d'un cours d'eau),
- le type de captage doit être connu (p.ex. forage horizontal, tranchée drainante), si possible au moyen d'un plan de l'ouvrage,

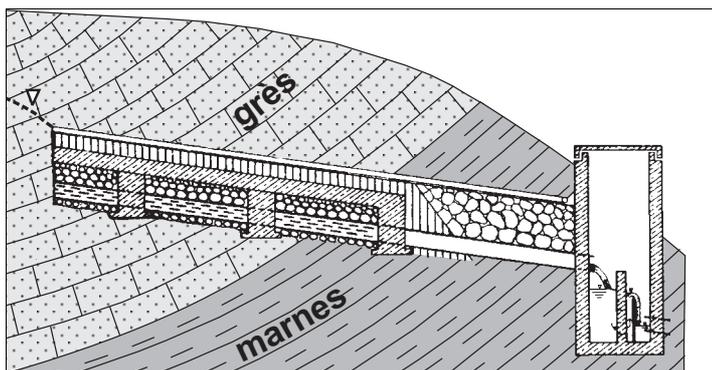


Figure 6: Schéma de captage. On voit la situation des drains et de la chambre collectrice par rapport aux couches géologiques (modifié d'après Schneider 1988).

- l'état du captage doit être évalué (p.ex. accumulation de particules fines) et les dégâts éventuels signalés (p.ex. fissures, couvercle mal fermé).

Caractérisation du contexte géologique et hydrogéologique

- répartition et propriétés hydrauliques générales des différentes formations géologiques,
- inventaire des principales familles de discontinuités à l'échelle locale (fractures à l'affleurement) et régionale (chevauchements, failles de grande extension).

Détermination des limites du bassin d'alimentation du captage (annexe 1)

- détermination de la surface approximative du bassin selon un rapide bilan annuel,
- prise en considération de données existantes concernant des essais de traçage,
- confrontation des résultats avec les dimensions du bassin hydrologique (déterminé selon la topographie), la structure géologique, et la présence d'autres sources dans la zone d'étude,
- délimitation du bassin d'alimentation.

Inventaire des sources de pollution existantes et potentielles sur le bassin d'alimentation

- sur la base d'informations obtenues auprès de la commune concernée ou auprès du service cantonal compétent, il s'agit de répertorier les endroits les plus exposés aux pollutions et de savoir à quelles périodes de l'année ces risques sont les plus élevés afin de réaliser les contrôles de la qualité de l'eau au moment opportun. Les plans concernant l'aménagement du territoire (plan directeur et plan d'affectation) doivent être consultés et les sites potentiellement pollués par des déchets doivent être localisés.

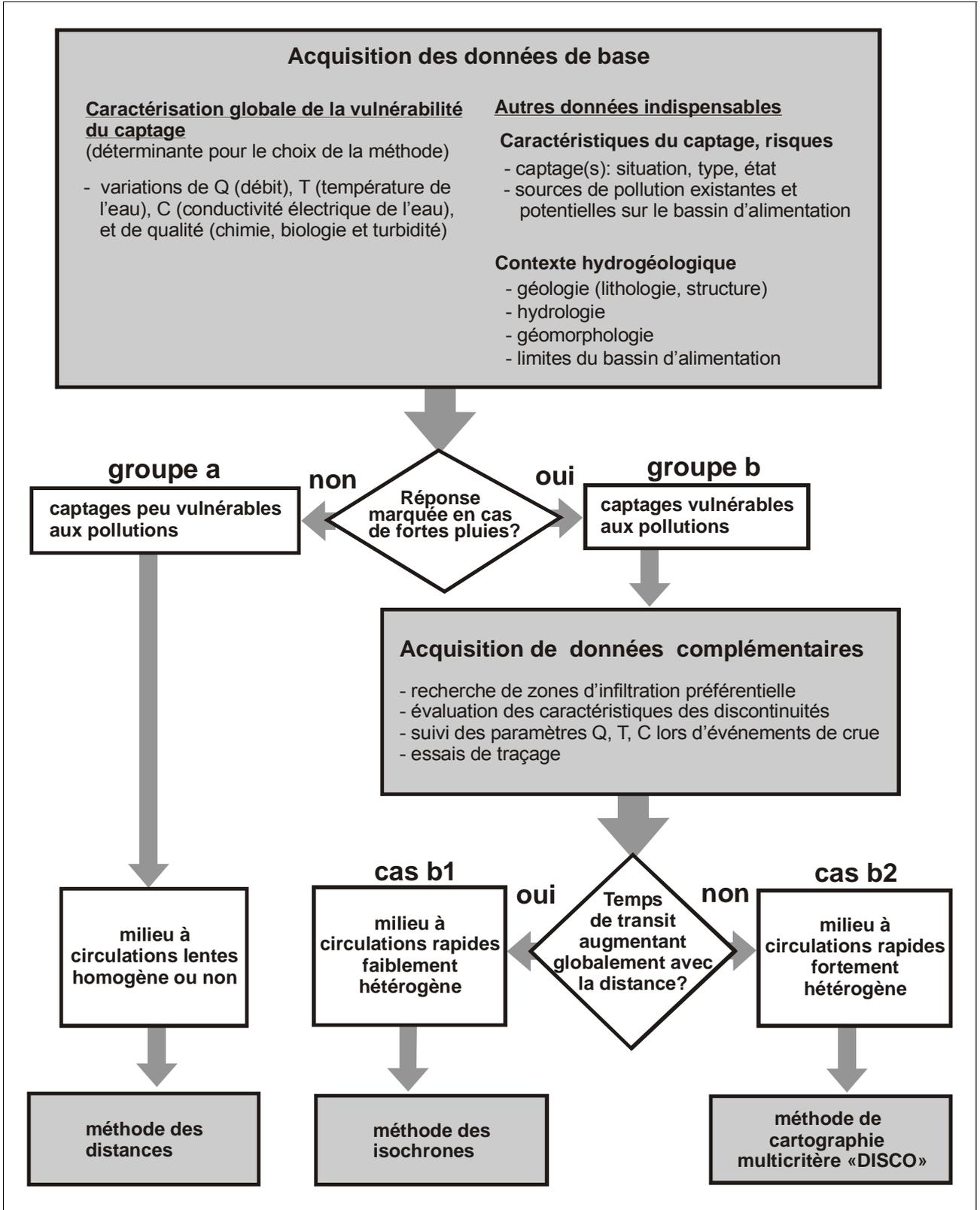


Figure 7: Démarche méthodologique pour la délimitation des zones de protection en milieu fissuré.

Caractérisation globale de la vulnérabilité du captage (annexe 2)

- suivi du débit, de la conductivité électrique et de la température de l'eau sur une longue période (au minimum 10 mesures réparties sur une année hydrologique) comprenant plusieurs mesures en période de fortes précipitations,
- échantillonnage de la qualité de l'eau (chimie, biologie, paramètres physiques) dans des conditions défavorables, p.ex. en cas de fortes précipitations durant la période d'estivage.

Lors de l'acquisition des données de base, un accent particulier doit être mis sur l'étude de la réponse hydrologique du captage (débits, paramètres physico-chimiques et qualité de l'eau) aux variations des conditions météorologiques. Ces données sont en effet déterminantes pour le choix de la méthode. Elles permettent d'évaluer la **vulnérabilité** du captage aux pollutions.

Au terme de cette première étape, la vulnérabilité du captage est évaluée sur la base d'un nombre représentatif de données et le fonctionnement hydrogéologique du site est suffisamment connu pour proposer un schéma conceptuel des écoulements. Les captages peuvent alors être séparés en deux groupes:

Groupe a: captages peu vulnérables

(figure 8a)

Les captages considérés comme peu vulnérables (voir chapitre 1) se distinguent par des caractéristiques physico-chimiques stables même en cas de fortes précipitations et par une absence de problèmes de qualité (biologie, turbidité). Ils peuvent aussi bien être liés à des milieux hétérogènes (circulations lentes le long de grandes structures drainantes, Maréchal 1998) qu'à des milieux relativement homogènes (fractures faiblement ouvertes distribuées de manière régulière sur le bassin d'alimentation).

Comme ces captages bénéficient d'une bonne protection naturelle vis-à-vis des impacts naturels ou anthropogènes sur le bassin d'alimentation, on considère qu'une approche relativement simple, n'exigeant pas la collecte de données supplémentaires, est suffisante pour garantir une protection efficace des ressources en eau.

On peut dans ce cas directement passer à la délimitation de zones de protection en considérant par simplification l'aquifère comme un milieu continu équivalent (voir chapitre 4.1).

Groupe b: captages vulnérables (figure 8b)

Les captages considérés comme vulnérables (voir chapitre 1) sont caractérisés par une fluctuation marquée des débits, des conductivités et des températures en cas de fortes précipitations. Cette fluctuation est souvent associée à une dégradation de la qualité de l'eau du point de vue de la bactériologie et de la turbidité. La proportion des eaux plus faiblement minéralisées et souvent de mauvaise qualité (biologie, turbidité) dépend fortement des conditions hydrologiques (maximum en période de crue, minimum en étiage après une longue période sans précipitation). Les captages caractérisés par ce type de comportement peuvent être liés à des aquifères dont le fonctionnement se rapproche soit plutôt de celui des milieux poreux (milieu fissuré faiblement hétérogène à l'échelle du bassin d'alimentation) soit plutôt de celui des milieux karstiques (milieu fissuré très hétérogène à l'échelle du bassin d'alimentation).

De tels captages sont particulièrement exposés aux pollutions puisqu'une proportion significative des eaux infiltrées sur le bassin d'alimentation transite rapidement en direction de l'ouvrage captant sans avoir le temps d'être filtrée et épurée naturellement.

Dans ce cas, des données complémentaires sont indispensables pour déterminer quelles parties du bassin d'alimentation alimentent le captage par l'intermédiaire de circulations rapides et pour évaluer le degré d'hétérogénéité de l'aquifère.

Cas particuliers

Effet piston: une augmentation nette et rapide des débits n'est pas systématiquement liée à l'arrivée d'eau fraîchement infiltrée, caractérisée par de faibles conductivités électriques. Dans le cas d'un **effet piston**, l'augmentation des charges hydrauliques lors de pluies abondantes pousse des eaux anciennes en direction du captage. **L'augmentation du débit n'est alors pas accompagnée d'une baisse des conductivités.**

Vulnérabilité d'un captage aux pollutions

Cette vulnérabilité dépend essentiellement de la rapidité avec laquelle les eaux fraîchement infiltrées (précipitations ou eaux de surface) arrivent à l'exutoire et de la contribution de celle-ci au débit capté.

La proportion des apports liés à des eaux résidant très peu de temps dans l'aquifère (\Rightarrow phénomènes de filtration et d'auto-épuration peu efficaces) varie fortement d'un site à l'autre et dépend des conditions hydrologiques.

Pour les captages peu vulnérables (groupe a), la proportion d'eau liée à des temps de transit courts dans l'aquifère reste faible, même en cas de fortes précipitations. Ceci se traduit par une bonne stabilité du débit, des paramètres physico-chimiques et de la qualité de l'eau quelles que soient les conditions hydrologiques (figure 8a).

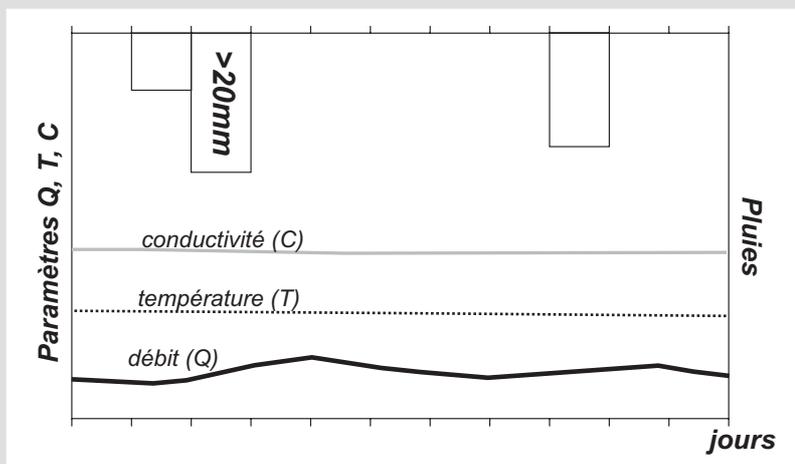


Figure 8a: Exemple fictif d'hydrogramme pour un captage peu vulnérable (groupe a)

Pour les captages vulnérables (groupe b), la proportion d'eau liée à des temps de transit courts est élevée lors de fortes précipitations, et faible en période d'étiage. Ceci se répercute clairement sur l'évolution du débit, des paramètres physico-chimiques et de la qualité de l'eau captée (figure 8b).

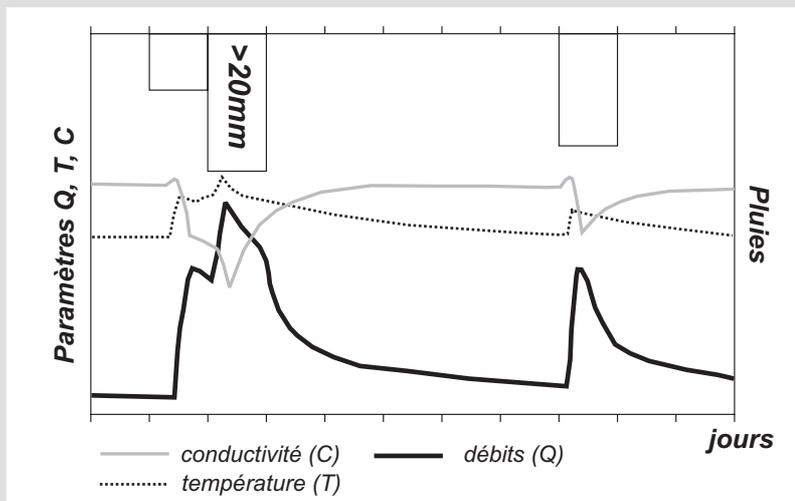


Figure 8b: Exemple fictif d'hydrogramme pour un captage vulnérable (groupe b)

Dans la majorité des cas, cet effet piston n'apparaît cependant qu'en début de la crue, puis est rapidement suivi d'une arrivée d'eau peu minéralisée (captage vulnérable). Selon la structure de l'aquifère, il est toutefois possible que seules des eaux relativement anciennes contribuent au pic de crue (captage peu vulnérable).

Faibles variations des débits dans le cas d'un captage vulnérable: dans certaines situations, dépendant de la structure de l'aquifère ou de la construction du captage, l'augmentation du débit peut être limitée alors qu'une dégradation de la qualité de l'eau est observée (captage vulnérable), en raison de:

- l'existence d'un trop-plein ou d'une zone de résurgence temporaire en amont du captage en période de hautes eaux. Dans ce cas, les variations de conductivité, de température et de qualité sont tout de même sensibles,
- l'infiltration d'une faible quantité d'eau de mauvaise qualité à faible distance du captage. Dans ce cas le débit, la conductivité et la température peuvent rester stables tandis que la qualité est dégradée.

3.2 Acquisition de données complémentaires pour les captages vulnérables – Evaluation du degré d'hétérogénéité de l'aquifère

Cette étude complémentaire comprend les points suivants:

Recherche de zones d'infiltration préférentielle

- observations de terrain concernant la géologie et la géomorphologie, complétées au besoin par l'étude de photos aériennes,
- observations de terrain en cas de fortes précipitations ou de fonte des neiges (phénomènes de ruissellement en surface, points d'infiltration),
- observations concernant le réseau hydrographique (pertes, cours d'eau infiltrants).

Caractéristiques des discontinuités

- observation des fractures à l'affleurement (et si possible en galerie), évaluation des caractéristiques des systèmes de discontinuités (orientation, fréquence,

extension, ouverture, phénomènes de dissolution, colmatage).

Suivi des paramètres débit (Q), température (T), conductivité (C) lors d'événements de crue

- une série de mesures serrées ou en continu sur une ou plusieurs crues permet de mettre en évidence la présence de réseaux de fractures très perméables (vidange rapide), d'estimer grossièrement la proportion d'apports rapides lors des crues et de mieux connaître les caractéristiques globales de l'aquifère au moyen des hydrogrammes (annexe 3).



Figure 9: Injection de sulforhodamine dans une fouille.
(Photo I. Favre)

Essais de traçage

- les essais de traçage permettent d'évaluer les vitesses de transit dans l'aquifère et de vérifier les hypothèses concernant les zones d'infiltration préférentielles et l'hétérogénéité de l'aquifère. De très bonnes connaissances géologiques doivent être cependant réunies avant l'injection d'un traceur (figure 9), pour augmenter les chances d'obtenir un résultat positif. Un certain nombre de recommandations sont proposées concernant la réalisation d'essais de traçage en milieu fissuré (annexe 4).

Sur la base de l'ensemble de ces observations, l'origine des contributions rapides est précisée et le degré d'hétérogénéité de l'aquifère peut être évalué (fort ou faible, voir encadré). Une méthode de délimitation des zones de protection adéquate est alors choisie selon les deux cas de figure possibles:

Cas b1: milieu faiblement hétérogène à l'échelle du bassin d'alimentation du captage

Dans ce cas, les temps de transit augmentent globalement en fonction de l'éloignement du captage. La délimitation de zones de protection sur la base de l'assimilation de l'aquifère à un milieu équivalent continu peut alors être admise, bien que le milieu reste le plus souvent hétérogène à l'échelle du mètre ou de la dizaine de mètres. L'extension des zones S est fixée selon le même principe qu'en milieu poreux, sur la base d'une

évaluation des vitesses de transit dans l'aquifère (voir chapitre 4.2).

Cas b2: milieu fortement hétérogène à l'échelle du bassin d'alimentation du captage

Ici, une partie des écoulements ont lieu le long d'un réseau de fissures localement très perméables avec possibilité de liaisons rapides (quelques heures à quelques jours) entre le captage et des zones réparties sur l'ensemble du bassin d'alimentation. Dans de tels cas, il convient d'appliquer la méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité « DISCO » développée dans le cadre de ce guide méthodologique. Elle permet l'établissement des zones de protection en tenant compte de la forte hétérogénéité du milieu (voir chapitre 5).

Evaluation de l'hétérogénéité des aquifères

Les critères suivants sont pris en compte pour distinguer les aquifères faiblement hétérogènes des aquifères fortement hétérogènes:

Aquifères faiblement hétérogènes: les temps de transit le long des réseaux de fractures les plus perméables augmentent globalement et de manière significative en fonction de la distance au captage.

Aquifères fortement hétérogènes: les temps de transit le long des réseaux de fractures les plus perméables n'augmentent pas de manière significative en fonction de l'éloignement du captage. Des connexions rapides (quelques heures à quelques jours) sont donc possibles entre des points répartis sur l'ensemble du bassin d'alimentation et le captage.

Données permettant de différencier les deux types d'aquifères:

Discontinuités et zones d'infiltration préférentielle

La présence de zones d'infiltration préférentielle, de dissolution ou d'érosion le long des fractures ou d'ouverture importante des systèmes de discontinuité laisse supposer la présence d'un réseau de fractures très perméables (aquifère fortement hétérogène).

Réaction des débits, conductivités et températures lors d'événements de crue

Lorsqu'un exutoire est caractérisé par une réaction rapide des débits et conductivités suite à de fortes pluies suivie d'une décrue rapide, on peut conclure à la présence d'un réseau de fractures très perméables se vidant rapidement (aquifère fortement hétérogène).

Lorsque les variations de débits et de conductivité sont caractérisées par une certaine inertie (variations moins intenses et décrue relativement lente) on doit plutôt conclure à la présence d'un réseau de fractures de perméabilité modérée et/ou relativement mal connectées avec le captage (aquifère faiblement hétérogène).

Essais de traçage

Interprétation des vitesses de transit

L'aquifère doit être considéré comme très hétérogène lorsque:

- les vitesses maximums sont de l'ordre d'une centaine de mètres par jour ou supérieures,
- aux limites du bassin d'alimentation du captage, l'isochrone indique un temps de parcours inférieur à dix jours, ou l'isochrone des dix jours implique de délimiter une zone S2 d'extension disproportionnée.

Interprétation des courbes de restitution

Un taux de restitution élevé et un pic peu dispersé dans le temps tendent à montrer la présence de circulations préférentielles le long de fractures de forte perméabilité (aquifère fortement hétérogène).

Une dispersion du pic sur une longue période peut être liée à des circulations le long de grandes structures à perméabilité modérée ou dans un réseau de nombreuses fractures interconnectées (aquifère faiblement hétérogène).

Remarque: les conditions de l'essai de traçage influencent fortement son résultat (annexe 4).

4 Délimitation des zones de protection – Aquifères fissurés assimilables à des milieux continus équivalents

4.1 Captages peu vulnérables (groupea), méthode des distances

Domaine d'application

Cette approche est adoptée lorsque l'absence de réactions rapides en cas de fortes précipitations est démontrée (figure 8a), et que la bonne qualité de l'eau est constante. Dans cette situation, la quasi-totalité des eaux captées est liée à des temps de transit élevés (p.ex. perméabilité modérée; eau d'origine relativement profonde) et les risques de pollution se limitent essentiellement à des infiltrations dans les abords immédiats du captage. Les captages caractérisés par ce comportement sont considérés comme peu vulnérables (voir chapitre 1). Ils peuvent aussi bien être liés à des milieux hétérogènes (circulations lentes le long de grandes structures drainantes, Maréchal 1998) qu'à des milieux relativement homogènes (fractures faiblement ouvertes distribuées de manière régulière sur le bassin d'alimentation).

Principe

On admet par simplification, indépendamment de la structure et de l'hétérogénéité de l'aquifère, que des zones S d'extension minimum sont suffisantes pour garantir une protection efficace du captage. De manière générale, les essais de traçage dans ces milieux sont rarement positifs (pas de restitution au cours d'un suivi de plusieurs semaines ou plusieurs mois). Un essai de traçage peut cependant être conseillé pour vérifier une hypothèse particulière ou lorsque les chroniques concernant le comportement hydrologique du captage ne sont pas suffisantes.

Procédure

L'extension des zones S est déterminée de la manière suivante (d'après OEaux 1998):

Zone S1

Au minimum 10 mètres autour et/ou en amont de l'ouvrage comprenant l'ensemble des drains, tranchées drainantes, galeries, etc. (figure 10, a). Dans le cas où des discontinuités en relation directe avec le captage jouent le rôle de drain, elles doivent être incluses dans la zone S1 (figure 10, b).

En cas de fortes pentes impliquant des ruissellements de surface ou de subsurface abondants en direction du captage, la zone S1 doit être suffisamment étendue pour exclure l'infiltration de polluants dans les environs immédiats du captage.

Zone S2

La distance entre les limites extérieures des zones S1 et S2 doit être au minimum égale à 100 mètres vers l'amont dans la direction générale des écoulements.

Zone S3

La distance entre les limites extérieures des zones S2 et S3 doit être au minimum égale à la distance entre les limites extérieures des zones S1 et S2.

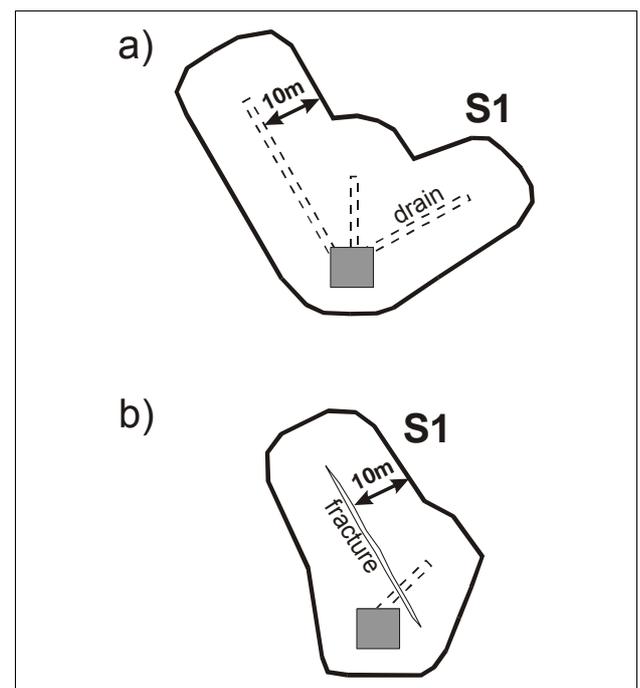


Figure 10: Délimitation des zones S1 en tenant compte a) de la situation des drains et b) de la présence d'une fracture directement drainée par l'ouvrage captant.

Remarque

Dans certains cas où ce sont exclusivement des eaux à temps de résidence élevés qui sont captées (exemple: forage crépiné à forte profondeur), il peut s'avérer superflu de définir les zones S2 et S3. Une bonne connaissance préalable du contexte hydrogéologique est cependant indispensable.

4.2 Captages vulnérables, milieu faiblement hétérogène (cas b1), méthode des isochrones

Domaine d'application

Cette approche est adoptée pour les captages caractérisés par une réaction rapide en cas de fortes précipitations (captages vulnérables, voir chapitre 1), lorsque le milieu fissuré peut être considéré comme faiblement hétérogène à l'échelle du bassin d'alimentation. Ces captages sont liés à des aquifères dont le fonctionnement se rapproche de celui des milieux poreux (milieu fissuré faiblement hétérogène à l'échelle du bassin d'alimentation).

Principe

La délimitation des zones de protection est effectuée selon les mêmes principes qu'en milieu poreux, sur la base d'une évaluation des vitesses de transit dans l'aquifère. Si plusieurs essais de traçage sont disponibles, on prend en compte la vitesse la plus élevée.

Procédure

Dans les aquifères fissurés, même lorsque l'assimilation de l'aquifère à un milieu équivalent continu est acceptable à l'échelle du bassin d'alimentation, le champ des perméabilités reste le plus souvent hétérogène à l'échelle du mètre ou de la dizaine de mètres.

La détermination de gradients hydrauliques et de la perméabilité n'étant généralement pas possible (piézomètres non représentatifs, essais de pompage impossibles dans les zones d'exutoires naturels), seuls les essais de traçage permettent d'évaluer les vitesses de transit dans l'aquifère. La réalisation de multitraçages permet d'augmenter les chances de restitution et d'obtenir une meilleure densité d'information sur la répartition des vitesses dans l'aquifère, sans augmenter beaucoup les coûts de l'étude.

Les vitesses déterminées dépendent toutefois du choix du point d'injection du traceur, d'où la nécessité de choisir une zone de bonne perméabilité sur la base d'observations de terrain et d'essais d'infiltration (annexe 4).

Sur la base des résultats des essais de traçage, les zones S sont délimitées de la manière suivante:

Zone S1

Voir chapitre 4.1 et figure 10.

Zone S2

La limite extérieure de la zone S2 correspond à l'isochrone des 10 jours calculée sur la base des résultats des essais de traçage. La distance entre les limites extérieures des zones S1 et S2 doit être au minimum égale à 100 mètres vers l'amont dans la direction générale des écoulements (figure 11).

Zone S3

La distance entre les limites extérieures des zones S2 et S3 doit être au minimum égale à la distance entre les limites extérieures des zones S1 et S2 (figure 11).

Cas particuliers

Lorsque des écoulements de surface ou de subsurface (cours d'eau s'infiltrant, ruissellement abondant, drainage naturel ou artificiel) sont susceptibles de favoriser un transport des polluants vers les zones S1 et S2 délimitées selon la procédure présentée ci-dessus, on prendra les mesures suivantes:

- en présence de ruissellement diffus ou de drainage à l'intérieur du bassin hydrogéologique du captage, on agrandira les limites des zones S1 et S2 en conséquence (figure 12, a),
- en présence de cours d'eau s'infiltrant (figure 12, b), il conviendra de protéger celui-ci en appliquant la réglementation régissant les aires A₀ (art 29, OEaux),
- en cas d'infiltration ponctuelle d'un cours d'eau contribuant à l'alimentation du captage par l'intermédiaire de circulations rapides, on examinera la possibilité d'imperméabiliser le lit du cours d'eau.

Lorsque le captage est en relation directe avec une ou plusieurs fracture(s) mise(s) en évidence sur la base de données géologiques, géomorphologiques, géophysiques ou à l'aide d'essais de traçage, ces informations doivent être prises en considération lors de la délimitation des zones S1 et S2 pour ajuster les limites de celles-ci (figures 10, b et 12, c).

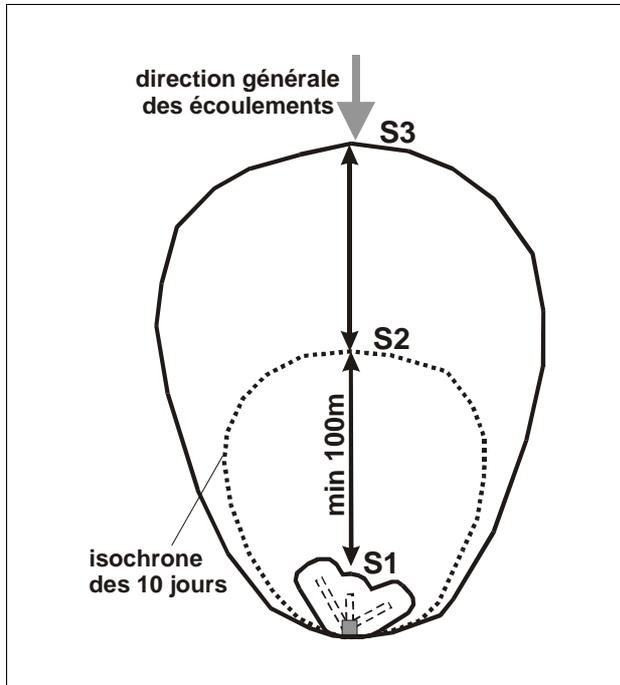


Figure 11: Délimitation des zones de protection dans le cas d'un milieu fissuré faiblement hétérogène

Remarques

En l'absence de traçages positifs ou représentatifs des vitesses de transit dans l'aquifère, les isochrones doivent être définies avec discernement. Pour les captages vulnérables, il est en effet inacceptable de définir une zone S2 d'extension minimale sur la base d'un traçage négatif ou impliquant des vitesses très lentes (ex.: quelques mètres par jour), si l'analyse de la réponse de la source démontre que des volumes importants d'eau fraîchement infiltrée arrivent en quelques heures au captage lors de fortes précipitations.

Dans de tels cas, en dernier recours, des hypothèses raisonnables concernant les vitesses ou les perméabilités (sur la base de la connaissance de contextes hydrogéologiques analogues) sont recommandées pour déterminer l'isochrone des 10 jours.

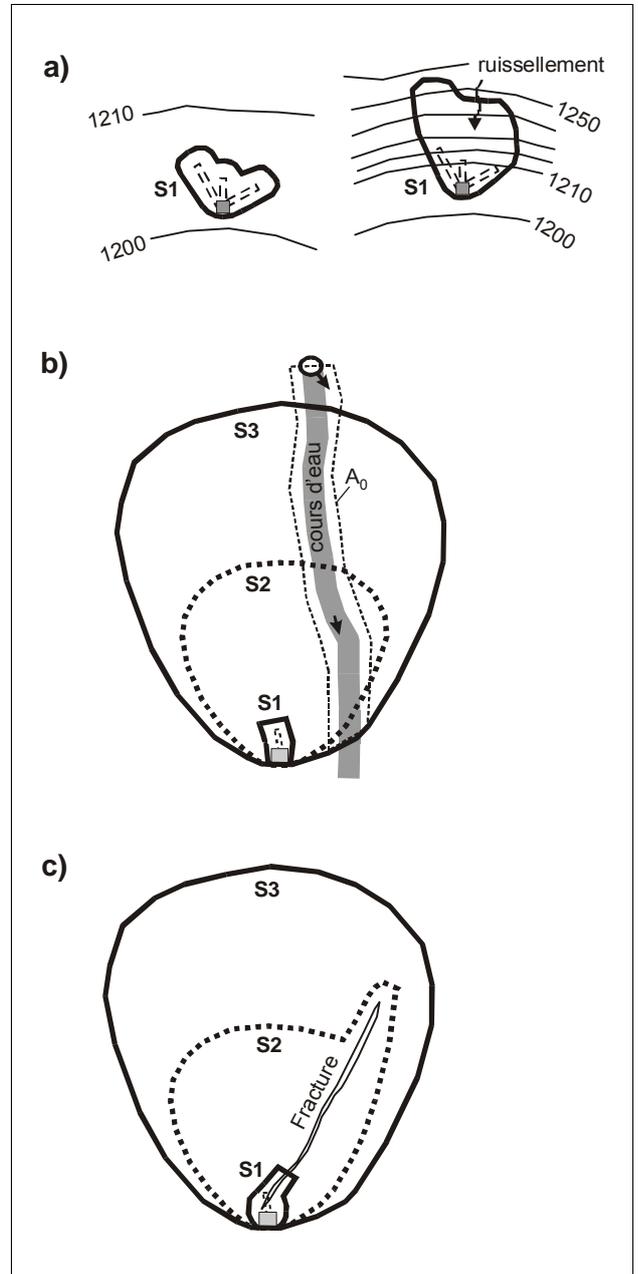


Figure 12: Particularités des zones de protection:

- délimitation des zones S1 d'extension égale à dix mètres au moins (à gauche) ou de dimension supérieure dans le cas de ruissellement abondant le long d'une forte pente (à droite),
- protection d'un cours d'eau s'infiltrant dans la zone S2,
- ajustement des zones S1 et S2 en fonction de la présence d'une fracture drainante directement connectée au captage.

5 Délimitation des zones de protection – Aquifères fissurés fortement hétérogènes, méthode « DISCO »

Captages vulnérables, milieu fortement hétérogène (cas b2), méthode de cartographie multicritère « DISCO »

5.1 Domaine d'application

Une approche par la cartographie de la vulnérabilité est nécessaire pour les captages situés dans les milieux fortement hétérogènes, en présence de circulations fissurales très rapides (d'une centaine de mètres ou plus par jour). De tels captages sont considérés comme particulièrement vulnérables (voir chapitre 1). Les temps de transit n'augmentent pas de façon progressive en fonction de l'éloignement du captage, et l'assimilation de l'aquifère à un milieu équivalent continu homogène et isotrope est inadaptée. La proportion des eaux plus faiblement minéralisées et souvent de mauvaise qualité (biologie, turbidité) dépend fortement des conditions hydrologiques (maximum en période de crue, minimum en étiage après une longue période sans précipitation).

Un grand nombre d'essais de traçages permettrait de déterminer directement la vulnérabilité sur l'ensemble du bassin d'alimentation, mais comme cela n'est pas réalisable, il est nécessaire d'utiliser une méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité.

La méthode « DISCO » (DIScontinuités – COuverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Elle est basée sur une évaluation de la vulnérabilité intrinsèque qui prend en considération les facteurs géologiques et hydrogéologiques conditionnant le fonctionnement de l'aquifère fissuré et un possible transport de polluant.

Lors de l'évaluation de la vulnérabilité, on se référera par convention à des conditions hydrologiques relativement défavorables (p.ex.: période de hautes eaux).

5.2 Principes, modèle conceptuel

Un modèle conceptuel permet de schématiser le fonctionnement hydrogéologique des milieux fissurés fortement hétérogènes. De manière générale, le schéma présenté au chapitre 2 (figure 2) est toujours globalement valable, mais les contrastes de perméabilité entre

Vulnérabilité des eaux souterraines

Définitions (d'après Daly et al. 2002)

La vulnérabilité peut être définie par rapport à la ressource ou par rapport au captage. Dans le cas de la délimitation des zones de protection, la vulnérabilité est définie par rapport au captage, en tout point du bassin d'alimentation, en estimant l'impact d'une pollution potentielle sur la qualité de l'eau captée. Cet impact peut théoriquement être évalué par la prise en considération de trois facteurs (figure 13): **temps de transit, atténuation de la concentration, masse restituée.**

Le terme de **vulnérabilité intrinsèque** est utilisé pour caractériser de manière globale la sensibilité des eaux souterraines aux contaminations. Il prend en considération les caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu naturel mais est indépendant de la nature du polluant et de l'utilisation du sol.

Le terme de **vulnérabilité spécifique** est quant à lui utilisé pour définir la sensibilité des eaux souterraines par rapport à un polluant ou un groupe de polluants ayant un comportement particulier. Il prend donc en considération les propriétés spécifiques des polluants et leurs relations avec les différents facteurs influençant la vulnérabilité intrinsèque.

La méthode « DISCO » est basée sur une évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. La vulnérabilité n'est pas une propriété directement mesurable mais son évaluation cartographique, basée sur l'observation du milieu naturel permet de définir des zones plus ou moins sensibles aux impacts anthropogènes et d'optimiser la gestion et la protection des eaux souterraines.

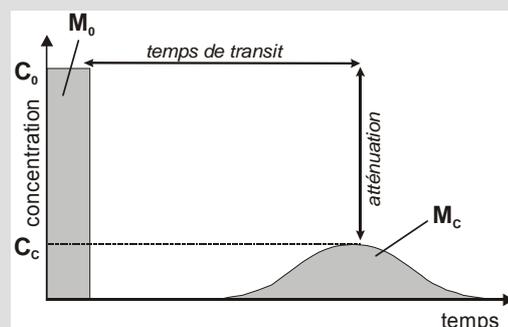


Figure 13: Impact sur le captage d'un input connu en un point du bassin d'alimentation. C_0 et M_0 = concentration et masse du polluant lors de l'input. C_c et M_c = concentration maximum et masse du polluant observées au niveau du captage.

le réseau de drains principaux et les « blocs » peuvent être très importants. Cela se traduit par des vitesses très élevées dans les drains (d'une centaine à plusieurs centaines de mètres par jour) et des écoulements localement turbulents (attestés par une forte turbidité en période de crue) tandis que les écoulements dans les blocs moins perméables restent lents (de l'ordre d'une dizaine de mètres par jour au maximum) et laminaires (attestés par le captage d'eau de bonne qualité en période de basses eaux).

La méthode des isochrones étant inapplicable dans de tels contextes, il s'est avéré nécessaire de mettre au point une nouvelle approche faisant appel à la cartographie de la vulnérabilité pour délimiter les zones de protection. Cette cartographie multicritère doit permettre de déterminer en tout point du bassin d'alimentation la plus ou moins grande facilité avec laquelle un polluant atteindrait le captage.

Trois paramètres sont jugés nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant d'un point quelconque du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage (figure 14):

- **le paramètre « discontinuités »** caractérise le transit de l'eau à l'intérieur de l'aquifère fissuré entre un point d'infiltration sur le bassin d'alimentation et le captage (p.ex.: zone fracturée fortement perméable en connexion rapide avec le captage; secteur peu fracturé),
- **le paramètre « couverture protectrice »** traduit l'effet protecteur des formations géologiques surmontant l'aquifère (sol, dépôts quaternaires, couches pré-quaternaires),
- **le paramètre « ruissellement »** englobe les phénomènes d'écoulement de l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires).

L'importance relative de ces différents paramètres et le mode de combinaison reposent sur des études de cas pratiques sur le terrain. L'évaluation de l'influence combinée de ces trois paramètres permet de déterminer un facteur de protection naturel en tout point du bassin d'alimentation.

5.3 Procédure

L'application de la méthode « DISCO » se déroule en quatre étapes (figure 15):

1. Evaluation et cartographie des paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice » sur l'ensemble du bassin d'alimentation, discrétisé en polygones élémentaires présentant des propriétés homogènes pour chacun des paramètres,
2. Calcul du facteur de protection intermédiaire F_{int} pour chaque polygone élémentaire du bassin d'alimentation. Pour ce faire, on pondère et additionne les valeurs des paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice »,
3. Dans le cas où F_{int} est faible ou très faible, on prend en compte le paramètre « ruissellement » pour déterminer le facteur de protection final F ,
4. Délimitation des zones S sur la base d'une relation d'équivalence entre la valeur du facteur de protection final F et les zones S1, S2 et S3.

5.3.1 Etape 1: évaluation des paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice »

Paramètre « DISCONTINUITÉS »

La cartographie de ce paramètre a pour but de:

- mettre en évidence les contrastes de perméabilité à l'intérieur de l'aquifère (failles régionales, zones plus ou moins fortement fracturées, fractures caractérisées par de plus ou moins grandes ouvertures),
- déterminer si les différents types de structures perméables sont en connexion rapide avec le captage ou non (notamment sur la base d'essai de traçage).

Cette cartographie s'effectue à l'échelle du bassin d'alimentation sur la base de données existantes (cartes géologiques), d'observations de terrain (géologie, géomorphologie), d'étude de photos aériennes, et si nécessaire de quelques profils géophysiques.

Les propriétés des différents types de discontinuité peuvent être évaluées d'une part sur la base d'observations de terrain (extension, ouverture, fréquence, orientation, colmatage, zones d'infiltration préféren-

tielle; si possible observations en galerie) et d'autre part à partir de résultats d'essais de traçage.

Quatre classes ont été définies pour caractériser le paramètre « discontinuités » (tableau 1). La classe D_0 correspond au cas le plus vulnérable.

Dans certaines situations particulières, on note la présence de circulations rapides sans que des indices géologiques ou géomorphologiques mettent en évidence des zones à perméabilité de fissure élevée. Il est dans ce cas nécessaire d'attribuer une classe D_1 ou D_2 , même en l'absence d'information concernant la répartition des discontinuités, de telle manière à se placer du côté de la sécurité. La classe D_3 ne doit être attribuée qu'en présence d'une zone de faible perméabilité attestée par des observations suffisantes, et assez éloignée de structures drainantes en relation rapide avec le captage. S'il est démontré qu'une discontinuité ou une zone de perméabilité élevée est sans liaison rapide avec le captage, elle sera assimilée à une zone de perméabilité modérée (D_2).

Paramètre « COUVERTURE PROTECTRICE »

La cartographie de ce paramètre a pour but d'évaluer la fonction protectrice des sols (définition pédologique) et des formations géologiques surmontant l'aquifère considéré. Selon l'épaisseur et la perméabilité de ces formations, les temps de transit sont plus ou moins élevés et les phénomènes de retardation/dégradation/dispersion des polluants sont plus ou moins efficaces avant que l'eau ne pénètre dans l'aquifère.

Trois classes de sol ont été définies en fonction d'une estimation de leur perméabilité et de leur épaisseur (tableau 2, a). Cette répartition s'appuie sur des observations de terrain (essais d'infiltration, étude des sols), et des données de la littérature (relation entre composition, perméabilité et pouvoir épurateur des sols). Par mesure de simplification, d'autres paramètres tels que la couverture végétale (champs, prairie, forêt) et la teneur en matière organique des sols (qui influence notamment la dégradation des polluants organiques et bactériologiques) ne sont pas pris en considération. Les classes d'épaisseur ont été fixées sur la base de l'estimation du temps de transit et de manière à pou-

voir mettre en évidence des contrastes dans les contextes généralement rencontrés en Suisse.

En présence de formations géologiques de faible perméabilité (moraines, dépôts de pente, marnes, zone d'altération argileuse) intercalées entre le sol et l'aquifère, l'indice déterminé pour les sols (tableau 2, a) doit être modifié pour tenir compte de l'effet protecteur additionnel de ces couches (tableau 2, b). Des sondages ponctuels à la tarière à main permettent de déterminer l'épaisseur de la couche de sol et d'en évaluer les caractéristiques sur la base d'une analyse sommaire (annexe 5). La cartographie des sols est effectuée sur la base d'un nombre suffisant de sondages répartis sur l'ensemble du bassin d'alimentation. Les données ponctuelles sont ensuite régionalisées en tenant compte du principe d'équivalence géomorphologique (terrain, photos aériennes).

Les formations géologiques de faible perméabilité sont mises en évidence sur la base d'observations géomorphologiques (dépôts de pente ou de moraines), géologiques (couches pré-quatérnaires) et sur la base de sondages à la tarière. Il est souvent difficile de déterminer l'épaisseur et la nature de ces couches. Les travaux de génie civil (fouilles, excavations) peuvent donner des indications précieuses, de même que l'utilisation de la géophysique.

Quelques essais d'infiltration (annexe 6) peuvent permettre de vérifier ponctuellement la perméabilité de la couverture protectrice.

5.3.2 Etape 2: calcul du facteur de protection intermédiaire F_{int}

Le facteur de protection intermédiaire permet de déterminer en tout point du bassin d'alimentation la plus ou moins grande facilité avec laquelle un polluant s'infiltrant dans le sol atteindra le captage. Un facteur de protection très faible correspond à une vulnérabilité très élevée. Cela implique qu'un polluant s'infiltrant en un point caractérisé par un facteur de protection très faible arrivera très rapidement au captage, sans que les phénomènes d'atténuation (filtration, auto-épuration, dilution) soient efficaces.

Le calcul du facteur de protection intermédiaire F_{int} (tableau 3) est effectué comme suit:

$$F_{int} = 2 \cdot D + 1 \cdot P$$

D: valeur du paramètre « discontinuités »

P: valeur du paramètre « couverture protectrice »

Le paramètre D est considéré comme ayant une importance prépondérante sur le facteur de protection. Des zones perméables de la roche en place peuvent générer dans la couverture des zones d'infiltration préférentielle en forme de doline. L'existence de passages préférentiels dans les sols liés à la présence de terriers, racines, fentes de dessiccation rend possibles des circulations rapides d'eau vers l'aquifère, même lorsque l'épaisseur de sol est supérieure à 1 mètre. L'utilisation de classes d'épaisseur a été choisie de manière optimale pour mettre au mieux en évidence les contrastes pour une grande partie des contextes rencontrés. En effet, pour de nombreux bassins d'alimentation, la couverture protectrice est limitée à un sol d'une épaisseur inférieure à 1.5 mètres.

5.3.3 Etape 3: détermination du facteur de protection final F

Paramètre « RUISSELLEMENT »

Le ruissellement de surface peut induire des déplacements latéraux de polluants sur plusieurs dizaines de mètres dans le cas de ruissellement diffus et plusieurs centaines de mètres le long de chenaux ou de drains naturels (cours d'eau permanents ou temporaires, rigoles, chemins). Il est donc indispensable de prendre en considération ces phénomènes dans le cadre d'une cartographie multicritère.

Contrairement aux deux autres paramètres qui sont cartographiés sur l'ensemble du bassin d'alimentation, *le ruissellement n'est pris en compte qu'en amont des zones pour lesquelles les paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice » conduisent à un facteur de protection faible ou très faible, et qu'en présence de ruissellement significatif.* Ainsi, la cartographie de ce paramètre nécessite de délimiter les bassins versants locaux alimentant par ruissellement les surfaces les plus vulnérables.

Dans ces bassins versants locaux, le facteur de protection final F est égal à la valeur F_{int} des surfaces vulnérables qu'ils alimentent (figure 15). En dehors de ces bassins locaux, le facteur de protection final F est égal au facteur F_{int} défini lors de l'étape 2.

Les trois facteurs déterminant en priorité le ruissellement sont la pente, la perméabilité du sol et les conditions antécédentes d'humidité. Par mesure de simplification, seuls la pente et le réseau de drainage de surface sont pris en considération lors de la cartographie de ce paramètre (tableau 4). Pour délimiter grossièrement les zones de ruissellement en amont des zones caractérisées par un facteur de protection naturel faible à très faible, on utilise les cartes topographiques à grande échelle (1:10'000 ou 1:5'000), des photos aériennes, voire un modèle numérique d'altitude (pas d'une grande utilité actuellement en raison d'une résolution de 25 m). Pour affiner cette délimitation, des observations de terrain sont indispensables, notamment en période de fortes précipitations ou de fonte des neiges.

5.3.4 Etape 4: délimitation des zones de protection

Validation des données

Avant de passer à la délimitation des zones de protection, il est nécessaire de vérifier la pertinence de la carte des facteurs de protection obtenue en vérifiant les points suivants:

- les données de terrain utilisées pour la cartographie des paramètres sont-elles fiables pour l'ensemble du bassin d'alimentation? En cas d'incertitude importante, est-il possible et utile d'acquérir des données complémentaires? Si ce n'est pas le cas, la cartographie des paramètres a-t-elle été effectuée de manière à se placer du côté de la sécurité?
- l'étendue totale des surfaces à facteur de protection faible ou très faible est-elle en accord avec le fonctionnement hydrodynamique du site considéré, avec le modèle conceptuel « DISCO » et avec la réponse globale du système? Par réponse globale, on entend dans ce cas la proportion de la lame d'eau infiltrée lors de fortes précipitations qui arrive rapidement au captage (jusqu'à quelques jours).

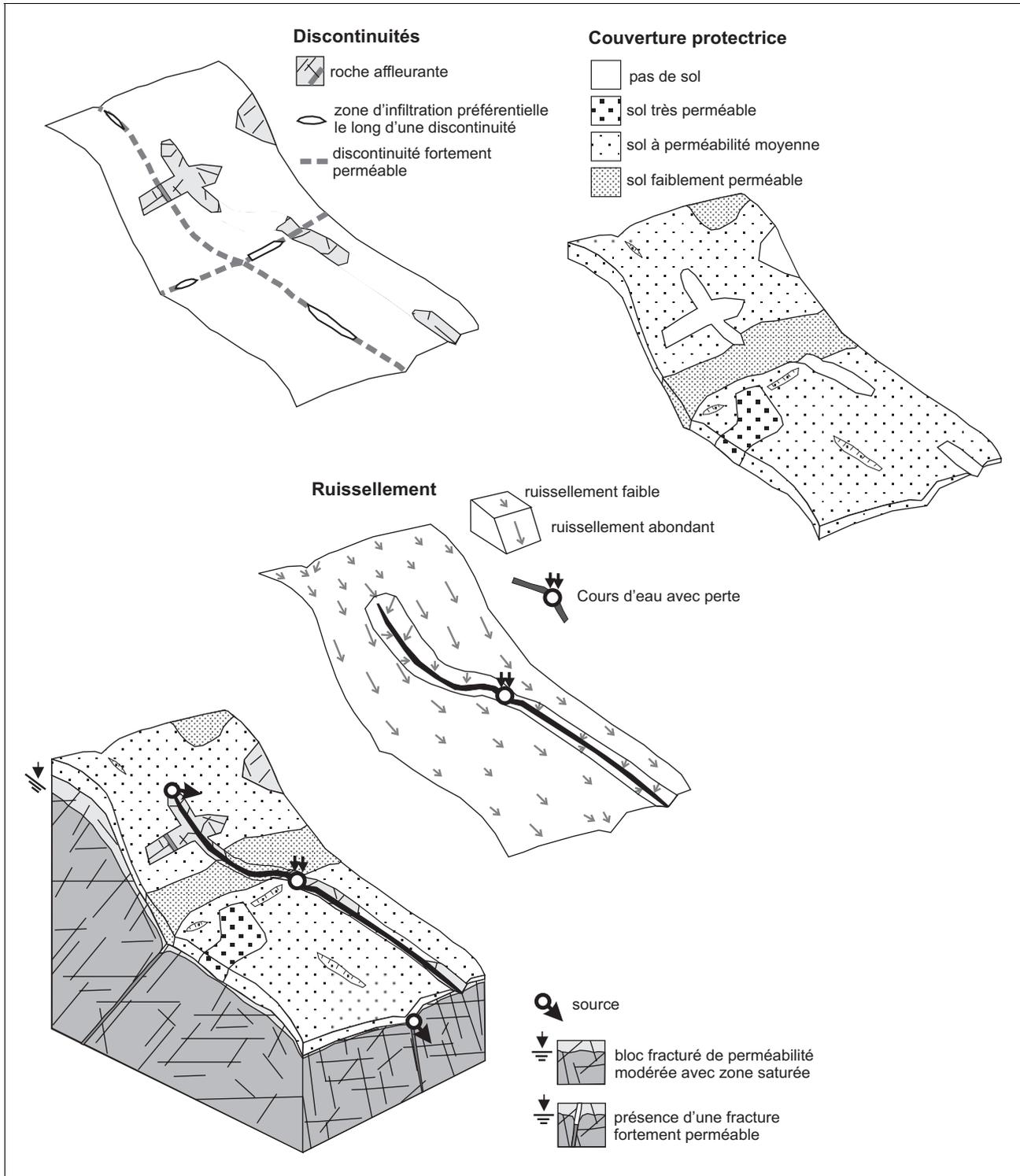


Figure 14: Représentation des trois paramètres pris en considération dans la méthode « DISCO ».

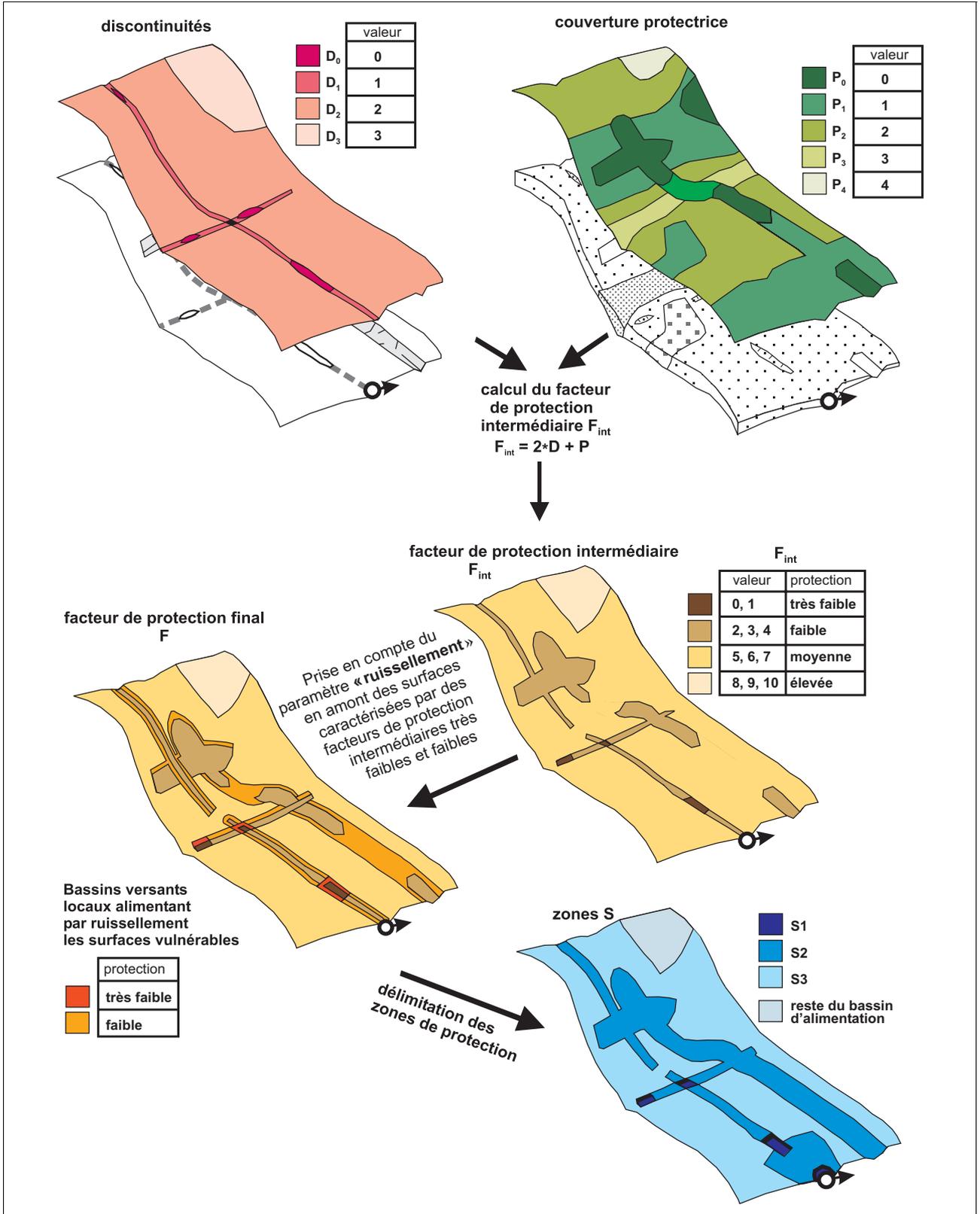


Figure 15: Délimitation des zones de protection selon la méthode de cartographie multicritère « DISCO ».

Tableau 1: Evaluation du paramètre « discontinuités ».

classe	valeur	critères d'évaluation
D ₀	0	Discontinuités en liaison très rapide avec le captage (de l'ordre d'une dizaine d'heures) / pas de phénomènes d'atténuation significatifs
D ₁	1	Discontinuités en liaison rapide avec le captage (de l'ordre de quelques jours) / phénomènes d'atténuation limités
D ₂	2	Liaison relativement lente avec le captage (de l'ordre d'une dizaine de jours) / phénomènes d'atténuation efficaces: zones de perméabilité modérée ou discontinuités sans liaison rapide avec le captage
D ₃	3	Liaison lente avec le captage (plusieurs dizaines de jours) / phénomènes d'atténuation très efficaces: zones caractérisées par des perméabilités faibles

Tableau 2: Evaluation du paramètre « couverture protectrice ».

a) sols (définition pédologique)			
épaisseur (m)	sol très perméable (sable, blocs)	sol à perméabilité moyenne (silt, limon)	sol peu perméable (limon, argile)
0–0.2	P ₀	P ₀	P ₀
0.2–0.5	P ₀	P ₀	P ₁
0.5–1.00	P ₀	P ₁	P ₂
> 1.00	P ₁	P ₁	P ₃

(Valeurs pour le paramètre P: P₀ = 0, P₁ = 1, P₂ = 2, P₃ = 3, P₄ = 4)

b) présence de formations géologiques, consolidées ou meubles, de faible perméabilité (argiles, limons, marnes)				
épaisseur	combiné à sol P ₀	combiné à sol P ₁	combiné à sol P ₂	combiné à sol P ₃
< 1 m	P ₁	P ₂	P ₃	P ₃
1–2 m	P ₂	P ₃	P ₃	P ₄
> 2 m	P ₃	P ₃	P ₄	P ₄

Tableau 3: Valeurs du facteur de protection intermédiaire.

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
D ₀	0	1	2	3	4
D ₁	2	3	4	5	6
D ₂	4	5	6	7	8
D ₃	6	7	8	9	10

valeur	F _{int} = 0, 1	F _{int} = 2, 3, 4	F _{int} = 5, 6, 7	F _{int} = 8, 9, 10
protection	très faible	faible	moyenne	forte
vulnérabilité	particulièrement forte	forte	moyenne	faible

Tableau 4: Détermination de l'extension des surfaces à considérer lors de la prise en compte du paramètre « ruissellement », valeurs indicatives.

a) ruissellement diffus le long des pentes (bassin versant local relativement uniforme sans chenaux ou système de drainage)	
pente	extension à attribuer au bassin versant local
2–10%	10 mètres en amont ou autour de la surface vulnérable considérée
10–25%	20 mètres en amont de la surface vulnérable considérée
>25%	30 mètres en amont de la surface vulnérable considérée
<p>En présence de talwegs, chenaux, chemins ou drains collectant les eaux de ruissellement, l'extension du bassin versant local à considérer doit être étendue en conséquence.</p> <p>L'extension des surfaces à considérer a été fixée sur la base d'observations réalisées essentiellement sur des secteurs de pâturage. De manière générale le ruissellement est souvent plus faible dans les secteurs de forêts, en raison de la présence d'un sol plus aéré d'épaisseur réduite. Dans ce cas, la prise en compte de bassins d'alimentation locaux d'extension plus petite (p.ex. 10 mètres même en cas de pentes supérieur à 25%) peut être admise.</p>	
b) cours d'eau permanents ou temporaires infiltrants	
Extension à attribuer au bassin versant local:	lit et berges du cours d'eau, bassin versant local selon les critères de pente spécifiés ci-dessus pour le ruissellement

Tableau 5: Relation d'équivalence entre le facteur de protection F et les zones S de protection des eaux souterraines.

facteur de protection F	vulnérabilité	zones S
F très faible (0, 1)	particulièrement forte	S1
F faible (2, 3, 4)	forte	S2
F moyen (5, 6, 7)	moyenne	S3
F fort (8, 9, 10)	faible	reste du bassin d'alimentation

Délimitation des zones de protection

La délimitation des zones de protection est effectuée sur la base d'une relation d'équivalence entre la valeur du facteur de protection final F et les zones S. Cette relation est présentée au tableau 5.

Remarques

- L'ouvrage captant est considéré comme une surface de vulnérabilité très élevée. La zone S1 au voisinage du captage s'étendra donc sur 10 à 30 mètres, selon la pente (figures 10 et 12a).
- Par mesure de précaution supplémentaire, aucune zone S3 ne doit, en principe, être définie à moins de 100 mètres de la zone S1 entourant le captage, et aucune surface appartenant au «reste du bassin d'alimentation» à moins de 200 mètres.
- La géométrie des zones S (contours hydrogéologiques) doit être simplifiée pour faciliter leur applica-

tion; la simplification doit se faire dans le sens d'une plus grande restriction à l'utilisation du territoire (p.ex. de S3 à S2). On tiendra compte des conditions locales, p.ex. des limites de parcelles (voir OFEFP 2004, Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines).

5.4 Ajustement et vérification de la méthode, recommandations

La valeur des paramètres, leur mode de combinaison et la relation d'équivalence entre les facteurs de protection et les zones S ont été définis sur la base de l'étude de plusieurs sites de test (chapitre 6). Des essais de traçage et d'infiltration ainsi que des investigations géophysiques ont notamment permis de vérifier l'adéquation du mode de détermination des facteurs de

protection et de délimitation des zones S. **Les valeurs définies dans le cadre de ce guide pratique sont applicables de manière générale dans les conditions rencontrées dans les milieux fissurés fortement hétérogènes en Suisse.**

Une bonne connaissance des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de chaque site est cependant indispensable pour que la méthode puisse être appliquée valablement. En effet, pour chaque site, l'évaluation des paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice » requiert une bonne évaluation des propriétés des sols et des caractéristiques hydrauliques des discontinuités (zones plus ou moins perméables, relation plus ou moins rapide avec le captage).

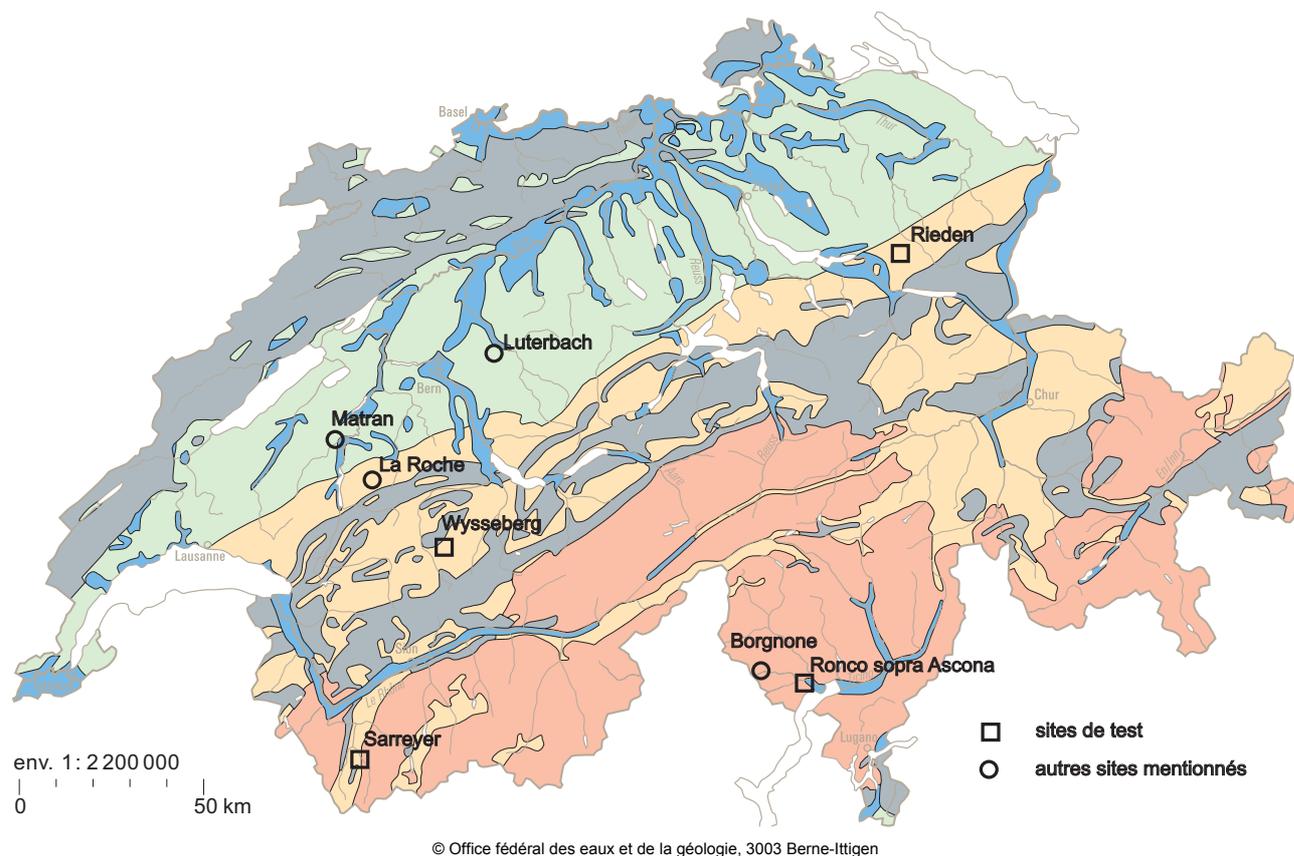
La réalisation d'essais de traçage peut s'avérer utile pour vérifier l'adéquation des zones S définies sur la base des cartes du facteur de protection. Il ne semble

cependant pas nécessaire de procéder systématiquement à des vérifications. Lors de la planification du déroulement de l'étude, il est préférable d'acquérir le maximum d'information possible (traçage, géophysique) avant de procéder à la cartographie de la vulnérabilité, plutôt que de réserver une partie trop importante du budget pour des vérifications. Cependant, si la valeur des facteurs de protection ne semble localement pas appropriée ou en cas de conflit, l'hydrogéologue pourra justifier des investigations à titre de vérification, essentiellement au moyen d'essais de traçage. Les résultats de l'essai de traçage étant dépendants des conditions d'injection et de l'état hydrologique du système (annexe 4), l'injection des traceurs doit être effectuée dans des conditions reflétant les scénarios de pollution envisagés sur le bassin d'alimentation et dans un état hydrologique plutôt défavorable (p.ex. hautes eaux).

6 Exemples d'application

Quatre exemples sont présentés de manière détaillée dans le cadre de ce guide pratique. Ces sites de test ont fait l'objet d'une application de la démarche méthodologique et illustrent l'utilisation des trois méthodes

développées aux chapitres 4 et 5. Quelques cas supplémentaires sont en outre évoqués brièvement, pour illustrer certaines particularités du fonctionnement des aquifères fissurés. Les cas examinés (figure 16)



classe	aquifère	lithologie unités lithostratigraphiques	porosité		type d'écoulement	répartition géographique
			interstice	fissure		
1	en roche meuble	dépôts fluvio-glaciaires, alluvions	élevée primaire	—	en milieu poreux	Plateau, vallées alpines et jurassiennes
2	en roche consolidée	grès, conglomérats, marnes <i>Molasse du Plateau et des synclinaux du Jura</i>	faible à moyenne secondaire (décalcification) et primaire	faible	en milieu fissuré	Plateau, vallées jurassiennes
3		grès, conglomérats, marnes, schistes, calcschistes, calcaires siliceux et dolomies non karstiques <i>Molasse subalpine, Flysch, Verrucano, Schistes lustrés et Bündnerschiefer, en partie Calcaires siliceux helvétiques ainsi que dolomies austroalpines et sudalpines</i>	faible à nulle surtout secondaire (décalcification)	moyenne à faible		essentiellement le long de fractures, localement élargies par dissolution
4		granites, gneiss, schistes, roches vertes, grès <i>Unités cristallines, Permo-carbonifère des nappes penniques</i>	—	moyenne à faible	le long de fractures	Alpes
5		calcaires, marnes, gypses, marbres <i>Mésozoïque du Jura et de l'Helvétique, roches carbonatées austroalpines et penniques</i>	—	élevée karstification	karstique	Jura, Préalpes, Alpes

Figure 16: Esquisse hydrogéologique de la Suisse avec localisation des sites de test présentés dans le cadre de ce chapitre. Les roches fissurées correspondent aux classes 2, 3 et 4 (description chapitre 2). (Esquisse A. Pochon, CHYN)

concernent tous des bassins d'alimentation de petite taille; ceci semble correspondre à une caractéristique générale des aquifères fissurés en Suisse.

6.1 Sarreyer (VS) – Gneiss et schistes de la nappe de Siviez-Mischabel

Captage peu vulnérable (groupe a),
méthode des distances

Introduction

Trois sources sont captées en amont du village de Sarreyer (Canton du Valais) à une altitude comprise entre 1330 et 1420 mètres: les sources des Rives, du Champi et du Rocher (figure 17), qui font partie du réseau d'alimentation en eau potable de la commune de Bagnes, et ont déjà fait l'objet d'une délimitation de zones de protection (Bruttin 1994). Une application de la démarche méthodologique à la source du Champi est présentée dans le cadre de ce chapitre.

Données de base – évaluation de la vulnérabilité du captage

Caractéristiques du captage

Les eaux du Champi sont captées à l'aide de quatre drains d'une longueur de 20 à 30 mètres forés subhorizontalement dans la roche fissurée à une profondeur comprise entre 3 et 10 mètres (Bruttin 1994). Les eaux sont collectées dans une chambre aveugle, puis amenées 90 mètres en contrebas vers une chambre qui collecte également les eaux de la source des Rives située 150 mètres en amont. Un bassin équipé d'un déversoir permet de déterminer le débit de la source du Champi avec une précision de l'ordre de 5%. L'état de la chambre de captage ne peut pas être évalué mais l'ouvrage où sont effectuées les mesures est en parfait état.

Contexte géologique et hydrogéologique

L'aquifère est constitué de gneiss et schistes de la nappe pennique de Siviez-Mischabel, autrefois partie de l'unité du Grand St-Bernard (Schaer 1960, Steck et al. 1999).

En amont de la zone de résurgence, la roche fissurée est le plus souvent recouverte de moraine remaniée et de dépôts de pente de un ou deux mètres d'épaisseur.

Au-dessus d'une altitude de 1500 mètres, l'épaisseur de la moraine est généralement supérieure à 2 mètres.

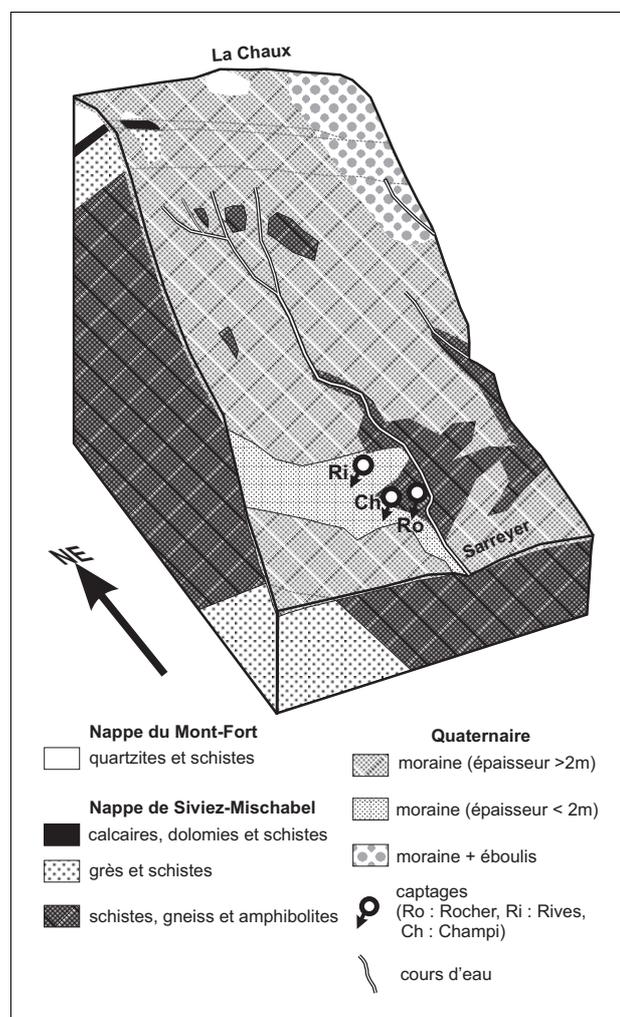


Figure 17: Bloc diagramme représentant schématiquement le contexte géologique du site de Sarreyer.

Les principaux systèmes de discontinuités observés à l'affleurement sont une foliation (pendage vers l'est d'environ 50°), et deux familles de fractures (240/70 et 340/70). Ces trois familles de plans apparaissent également à l'échelle régionale dans la géomorphologie, notamment soulignées par l'orientation des cours d'eau.

Les sources du Champi et des Rives s'alignent sur une dépression géomorphologique dans le prolongement du lit du torrent de Sarreyer (figure 18).

Extension et limites du bassin d'alimentation

Un calcul de bilan global a été effectué pour déterminer le bassin d'alimentation de la zone de résurgence, vu que les sources du Champi, des Rives et du Rocher présentent des caractéristiques physico-chimiques semblables. La prise en considération de précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 1400 mm (Kirchhofer & Sevruc 1992; MétéoSuisse 2000), d'une évapotranspiration de 450 mm (Menzel et al. 1999) et d'une lame ruisselée de 300 mm (~20% des précipitations) implique une infiltration efficace de l'ordre de 650 mm/an. Le débit moyen annuel des sources est d'environ 300 l/min pour le Champi, 200 l/min au total pour les Rives et le Rocher. En considérant un débit supplémentaire de 100 l/min pour de petites résurgences non captées, le débit moyen de la zone d'exutoire est de l'ordre de 600 l/min, ce qui correspond à une surface d'alimentation de 0.5 km² au minimum. Le bassin d'alimentation de ces sources doit ainsi s'étendre jusqu'à une altitude voisine de 2000 m, en direction de la Chaux (figure 18).

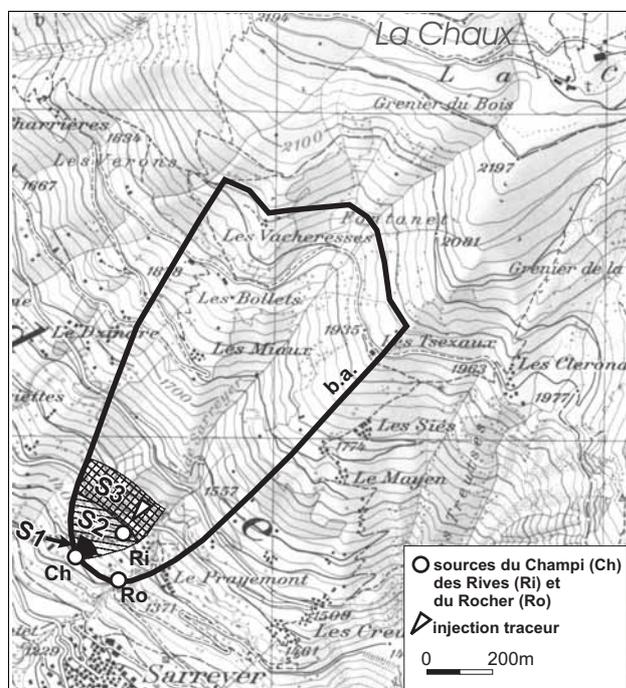


Figure 18: Zones de protection (proposition, dans le cadre de cette étude, pour la source du Champi uniquement) et extension probable du bassin d'alimentation (b.a.) de l'ensemble de la zone de résurgence.

(Reproduit avec l'autorisation de swisstopo, BA035259)

Sources de pollution existantes et potentielles

Une quinzaine de chalets et mayens sont situés à une distance du captage comprise entre 100 et 200 mètres, puis une trentaine dans un rayon compris entre 200 et 1000 mètres (les Vacheresses, les Bollets, Les Miaux). Une étable est située au nord-ouest des Bollets à environ 900 mètres du captage. Une route goudronnée peu fréquentée traverse le bassin versant à relativement faible distance de la source du Champi (140 mètres). Le départ des téléskis et le restaurant de la Chaux sont situés à près de deux kilomètres en amont des sources, vraisemblablement au-delà de leur bassin d'alimentation (figure 18).

Caractérisation globale de la vulnérabilité du captage

Le captage du Champi est caractérisé par une grande stabilité des paramètres débit, conductivité et température. Aucune variation sensible de ces paramètres n'a été identifiée au cours des observations régulières de juillet à novembre 1997, comprenant l'enregistrement de données en continu pour les mois d'octobre et novembre:

débit: 290 (+/- 15) l/min
conductivité (20°C): 234 (+/- 4) μ S/cm
température: 8.4 (+/- 0.2)°C

Ces données impliquent que les eaux sont d'origine relativement profonde (pas d'augmentation des températures au cours de l'été). Elles sont caractérisées par un tarissement très lent (pas de baisse des débits observée malgré une fin d'été et un automne secs). Une incertitude demeure concernant la réponse du captage aux fortes précipitations, en raison de l'absence de fortes pluies lors de l'échantillonnage en continu, mais un événement de 10 à 15 mm n'a eu aucun effet sur les paramètres enregistrés. Une période de fortes précipitations (60 mm en trois jours) n'a permis de voir aucune modification des paramètres, lors d'observations réalisées trois jours plus tard.

Une mesure effectuée dans le cadre de la délimitation des zones de protection (Bruttin 1994) semble montrer une baisse significative des débits à la fin de l'hiver (environ 120 l/min en mars 1994). Une absence de réalimentation de l'aquifère pendant 3 ou 4 mois en raison de l'accumulation des précipitations sous forme de

neige pourrait expliquer cette baisse des débits, qui n'est pas accompagnée d'augmentation des conductivités. Les données à disposition ne sont toutefois pas suffisantes pour caractériser les fluctuations saisonnières.

Concernant la qualité de l'eau, aucun problème bactériologique ou de turbidité n'a été signalé, si ce n'est la présence à deux reprises d'un nombre trop élevé de germes au niveau d'un réservoir collectant l'eau des trois sources. Ces eaux peuvent être considérées comme de très bonne qualité et ne nécessitent aucun traitement.

Une liaison rapide entre le torrent de Sarreyer et le captage du Champi est peu probable vu la distance de plusieurs centaines de mètres qui les sépare, la stabilité des paramètres physico-chimiques (pas de modification de la température de la source alors que celle du torrent varie clairement) et l'absence de turbidité.

En conclusion, sur la base des données à disposition, le captage semble bien protégé vis-à-vis des impacts sur le bassin d'alimentation. Cette faible vulnérabilité est due à des écoulements relativement profonds impliquant des temps de transit élevés dans l'aquifère et à la présence d'une épaisseur significative de dépôts meubles sur une grande partie du bassin d'alimentation. Le type de captage (forages subhorizontaux dans la roche fissurée) implique également que l'ouvrage est peu vulnérable aux écoulements de subsurface. Quelques mesures supplémentaires de débit, conductivité et température seraient toutefois utiles pour évaluer les variations saisonnières et la réaction du captage à de très fortes précipitations (>20 mm par jour).

Autres données à disposition

Un essai de traçage réalisé dans le cadre de la délimitation des zones de protection (Bruttin 1994) 40 mètres en amont du captage des Rives et à 150 mètres de la source du Champi (figure 18) n'a donné aucune réponse positive lors d'une période d'observation de quinze jours pour les trois sources. 2 kg de naphthionate avaient alors été injectés à l'aide d'environ 4 m³ d'eau dans une fouille de 1.5 mètres de profondeur présentant une perméabilité de l'ordre de 1•10⁻⁵ m/s. Cet essai de traçage négatif confirme donc la faible vulnérabilité du captage (cas a de la figure 7).

Délimitation des zones de protection

Une délimitation de zones de protection d'extension minimum serait donc suffisante pour garantir la qualité de l'eau du Champi.

L'étendue de la zone S1 vers l'amont devrait être d'environ 30 mètres en raison de la présence de drains forés subhorizontalement. La distance entre les limites extérieures des zones S1 et S2 devrait être d'au minimum 100 mètres et la distance entre les limites extérieures des zones S1 et S3 au minimum de 200 mètres. A noter que la géométrie des zones proposée cidessus (figure 18, contours hydrogéologiques) ne tient pas compte de la répartition parcellaire.

Comparaison avec les zones de protection existantes

Une zone S2 commune pour les sources du Champi et du Rocher et une seule zone S3 pour l'ensemble des trois sources ont été définies (Bruttin 1994), ce qui se justifie vu leur faible éloignement (figure 19). L'extension de la zone S2 en amont du captage du Champi est actuellement d'environ 120 mètres, ce qui est en accord avec le comportement du captage (faible vulnérabilité, circulations lentes).

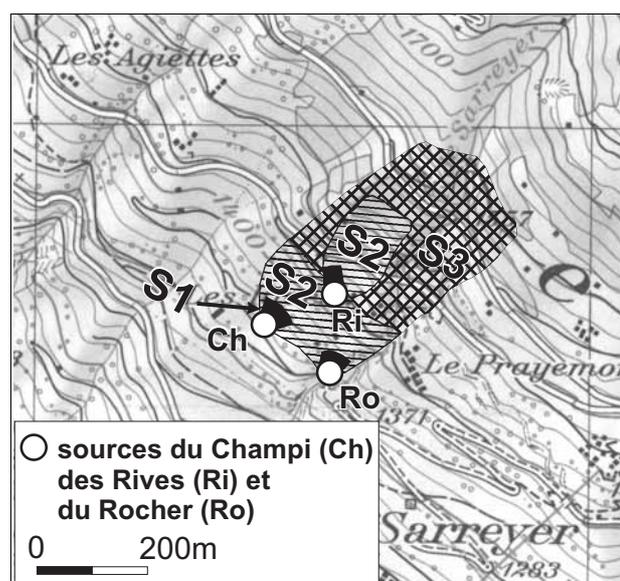


Figure 19: Représentation des zones de protection actuelles des sources du Champi, du Rocher et des Rives (d'après Bruttin 1994). (Reproduit avec l'autorisation de swisstopo, BA035259)

L'application de la démarche méthodologique développée dans ce guide pratique exigerait toutefois un nombre plus élevé d'observations (débit, conductivité et température) afin de mieux connaître le comportement des deux autres sources, qui ne présentent pas exactement les mêmes caractéristiques que celle du Champi:

- la source du Rocher, captée à l'aide de forages sub-horizontaux, semble être caractérisée par un comportement hydrologique stable, mais la question de l'infiltration du torrent de Sarreyer situé environ 30 mètres en amont devrait être étudiée,
- la source des Rives, captée par tranchée drainante, montre une plus grande fluctuation des débits. Un apport d'eau peu minéralisée et potentiellement de mauvaise qualité lors des périodes de forte précipitation est possible. Cette question devrait être vérifiée par quelques mesures supplémentaires de débit, conductivité et température. Le résultat négatif de l'essai de traçage ne permet en effet pas de prouver à lui seul la faible vulnérabilité du captage.

6.2 Ronco sopra Ascona (TI) – Gneiss et amphibolites de la zone d'Ivrée

Captage vulnérable, milieu faiblement hétérogène (cas b1), méthode des isochrones

Introduction

La source de Livurcio est située sur le territoire de la commune de Ronco sopra Ascona (Canton du Tessin). Elle n'est actuellement pas raccordée au réseau d'eau potable, principalement en raison de la présence d'une route secondaire située à une dizaine de mètres en amont (figure 23).

En raison de ses caractéristiques hydrogéologiques et de critères logistiques (possibilité d'installer des appareils et d'amener de l'eau pour l'injection de traceur, suivi régulier en collaboration avec l'Institut des sciences de la terre du canton du Tessin), ce site a tout de même été choisi pour tester et illustrer l'application de la démarche méthodologique.

Données de base – évaluation de la vulnérabilité du captage

Caractéristiques du captage

L'eau sort d'une fissure de la roche le long d'un petit talweg à une altitude de 415 mètres. Une chambre ancienne, construite directement sur la roche affleurante permet de collecter les eaux. Les murs de l'ouvrage sont fissurés et ne constituent pas une protection optimale contre d'éventuels ruissellements provenant de la route. En période de hautes eaux, des résurgences temporaires apparaissent au-dessus de la chambre et ruissellent sur le toit.

Contexte géologique et hydrogéologique

L'aquifère est constitué essentiellement de métadiorites et de méta-gabbros de la zone d'Ivrée. Ces roches ont été fortement déformées à haute température et forment des alternances de lits plus au moins basiques. A l'affleurement, ces roches apparaissent fracturées de façon relativement homogène. Malgré la présence de fortes pentes (40 à 50%), aucun phénomène de tassement n'est observé et l'ouverture des fractures liée à la décompression ne semble pas particulièrement marquée. A l'échelle régionale, plusieurs talwegs orientés NW-SE à N-S suggèrent la présence de discontinuités de relativement grande extension.

La couverture de sol est généralement peu épaisse (0 à 50 cm de sol bien aéré et perméable), les roches sont affleurantes ou subaffleurantes dans la zone de résurgence et sur la plus grande partie du bassin d'alimentation.

Il n'y a pas de cours d'eau dans les environs immédiats du captage et selon les observations effectuées en période de crue, il ne semble pas que le talweg collecte des eaux de ruissellement.

Extension et limites du bassin d'alimentation

Un bilan annuel approximatif considérant des précipitations annuelles de 2100 mm (Kirchhofer & Sevruck 1992; MétéoSuisse 1999), une évapotranspiration de 700 mm (Menzel et al. 1999) et un ruissellement de 200 mm (10% des précipitations) impliquent une infiltration efficace de l'ordre de 1200 mm. Pour un débit

moyen annuel de 400 l/min, la surface minimale nécessaire à l'alimentation du captage est de l'ordre de 0.2 km² (figure 23).

Sources de pollution existantes et potentielles

En dehors de la route goudronnée située directement en amont du captage, la plus grande partie du bassin d'alimentation est située en forêt. Une deuxième route passe environ 500 mètres au nord-ouest du captage. Un groupe d'habitations se trouve à 400 mètres au nord de la source, un autre à 500 mètres au nord-ouest (figure 23).

Caractérisation globale de la vulnérabilité du captage

Le débit de la source de Livurcio est suivi régulièrement par l'Institut des sciences de la terre du canton du Tessin depuis 1997 dans le cadre d'un projet de construction d'un tunnel dans la région. Les données à disposition montrent des variations significatives des débits au cours de l'année (figure 20). Les températures (variations saisonnières) et les conductivités varient également de manière sensible. Aucune analyse bactériologique n'est disponible pour cette source, qui n'est pas utilisée actuellement comme eau de boisson.

En conclusion, les eaux alimentant la source de Livurcio proviennent exclusivement d'un aquifère fissuré. La fluctuation significative des débits en cas de fortes précipitations et les variations des températures et conductivités suggèrent que ce captage est potentiellement vulnérable aux contaminations. L'acquisition de données complémentaires est donc nécessaire (groupe b de la figure 7).

Données complémentaires – évaluation du degré d'hétérogénéité de l'aquifère

Zones d'infiltration préférentielle, caractéristiques des discontinuités

Aucune zone d'infiltration préférentielle n'a été mise en évidence. Les talwegs peuvent être considérés comme des zones fissurées potentiellement plus perméables

que le reste de l'aquifère. Des profils géophysiques réalisés avec des méthodes électromagnétique (VLF-em) et électrique (PS) ont confirmé la présence de roche fracturée au droit de ces éléments géomorphologiques. D'autres anomalies n'apparaissant pas systématiquement dans la géomorphologie ont également été mises en évidence et montrent la présence de discontinuités tous les 15 ou 20 mètres.

Suivi détaillé des paramètres Q, T, C

Des mesures en continu (débit, conductivité, température) ont été réalisées de mars à juillet 2000 dans le cadre de l'élaboration de ce guide pratique (figure 21). Une forte augmentation des débits accompagnée d'une baisse des conductivités et des températures a été observée à mi-avril à la suite de très fortes précipitations (300 mm en une semaine), ce qui montre une contribution significative d'eau fraîchement infiltrée en période de crue. Par contre, trois événements pluvieux de 20 à 40 mm en mars et début avril n'ont eu que peu d'influence sur le comportement de la source. Cela pourrait être dû à un déficit d'eau important dans les sols et la zone non saturée à la suite d'une période de sécheresse de décembre à mi-mars. De manière générale le captage est tout de même caractérisé par une certaine inertie, comme le prouvent les faibles réactions en cas de pluie modérée et le tarissement relativement lent lors des périodes d'étiage.

Essais de traçage

Dans le cadre de l'élaboration de ce guide pratique, deux traceurs ont été injectés à respectivement 25 mètres (tinopal) et 80 mètres (uranine) du captage en période de relativement hautes eaux (19.5.2000). L'injection des traceurs a été effectuée dans deux talwegs (figure 23). Les résultats montrent des vitesses d'environ 15 mètres/jour pour le traceur injecté à 25 mètres directement dans le talweg conduisant à la source et d'environ 8 mètres/jour pour le deuxième traceur (figure 22). Les restitutions des traceurs sont faibles, entre 3 et 5%.

Figure 20:
Relevés mensuels des débits (●), conductivités (□) et températures (Δ) à la source de Livurcio (mesures effectuées par l'Institut des sciences de la terre du canton du Tessin).

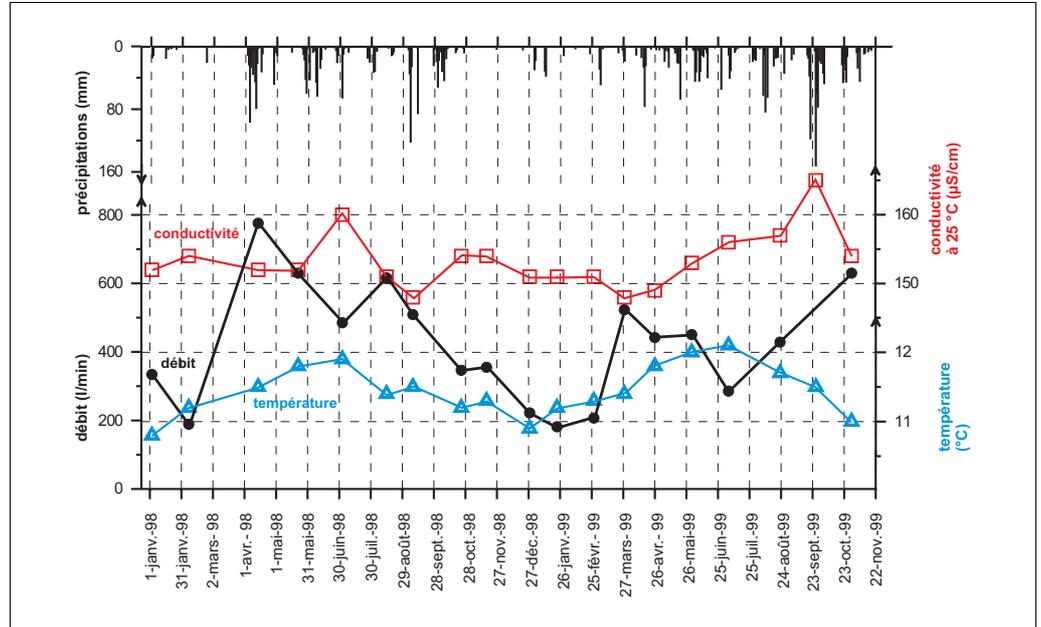
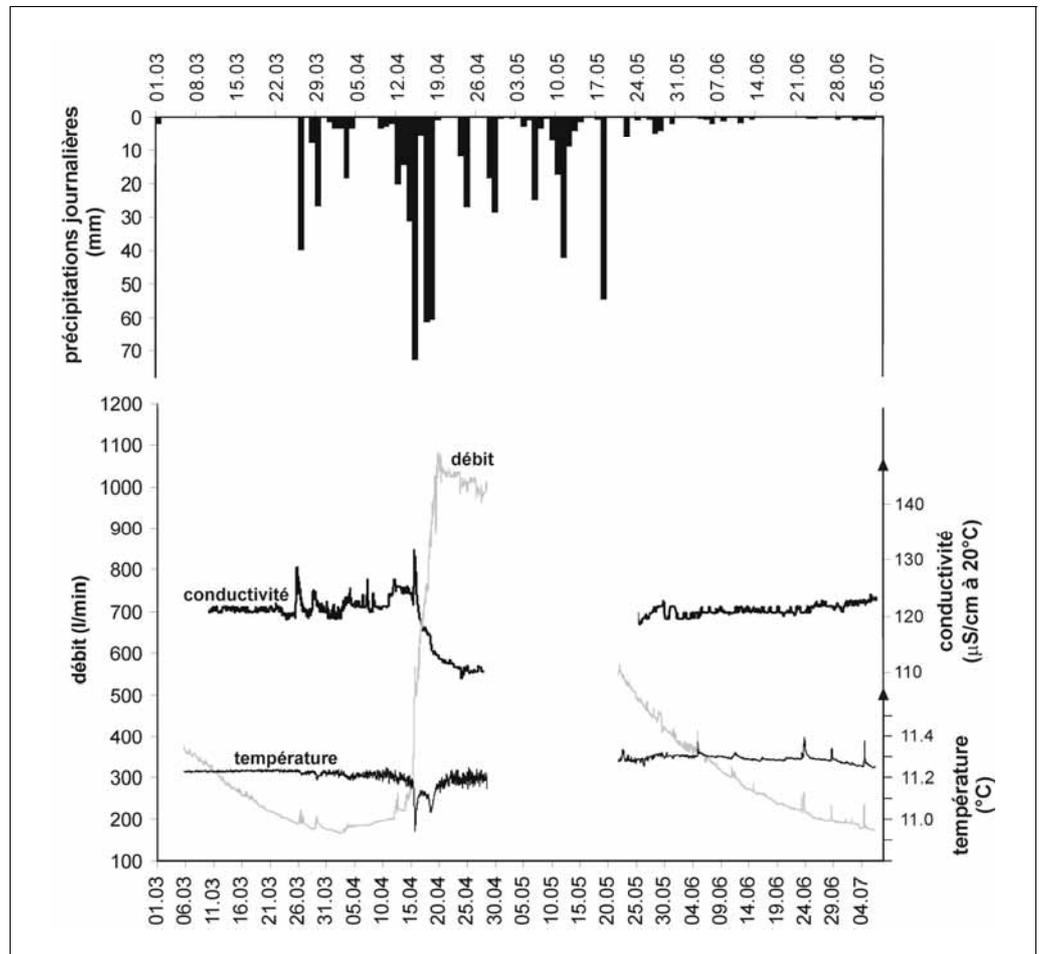


Figure 21:
Suivi en continu de la source de Livurcio, effectué dans le cadre de la présente étude. Seule la période de très fortes précipitations du 12 au 18 avril 2000 met en évidence l'arrivée d'eau peu minéralisée au captage.



Degré d'hétérogénéité de l'aquifère

Les vitesses déterminées par traçage permettent de conclure à une augmentation globale des temps de transit en fonction de la distance au captage et à l'absence de circulations très rapides le long de structures de forte perméabilité. La réaction modérée de l'aquifère aux précipitations, même lors des périodes extrêmement pluvieuses rencontrées au Tessin, confirme également l'absence de structures très perméables. L'aquifère peut donc être considéré comme faiblement hétérogène (cas b1 de la figure 7).

Délimitation des zones de protection

Dans une telle situation, la délimitation de zones de protection par la méthode des isochrones est adéquate. La zone S1 s'étendrait jusqu'à la route, à une dizaine de mètres du captage. La limite extérieure de la zone S2 devrait être placée à 150 mètres du captage sur la base de l'essai de traçage (vitesses d'environ 15 m/j) et la limite extérieure de la zone S3 à 140 mètres de la limite extérieure de la zone S2 (figure 23).

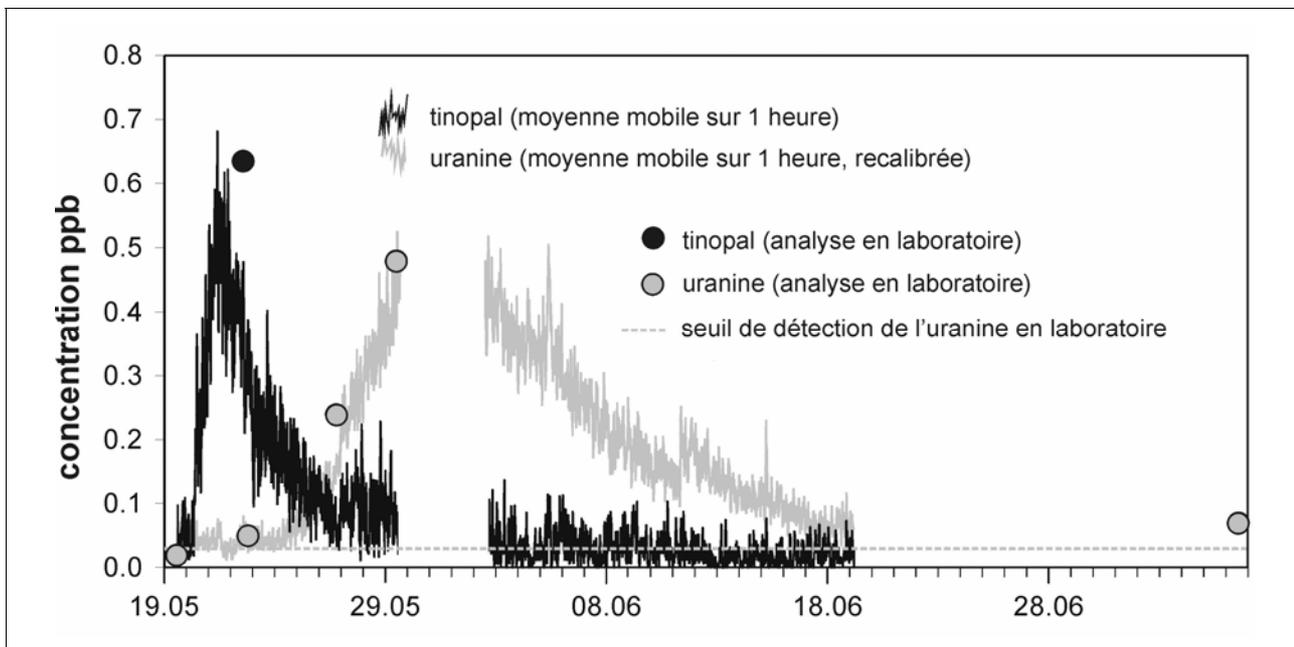


Figure 22: Résultats de l'essai de traçage effectué à Livurcio en mai 2000, dans le cadre de l'élaboration de ce guide pratique. Les données ont été enregistrées en continu à l'aide d'un spectrofluorimètre de terrain. Quelques prélèvements manuels analysés en laboratoire ont permis de vérifier les données enregistrées en continu.

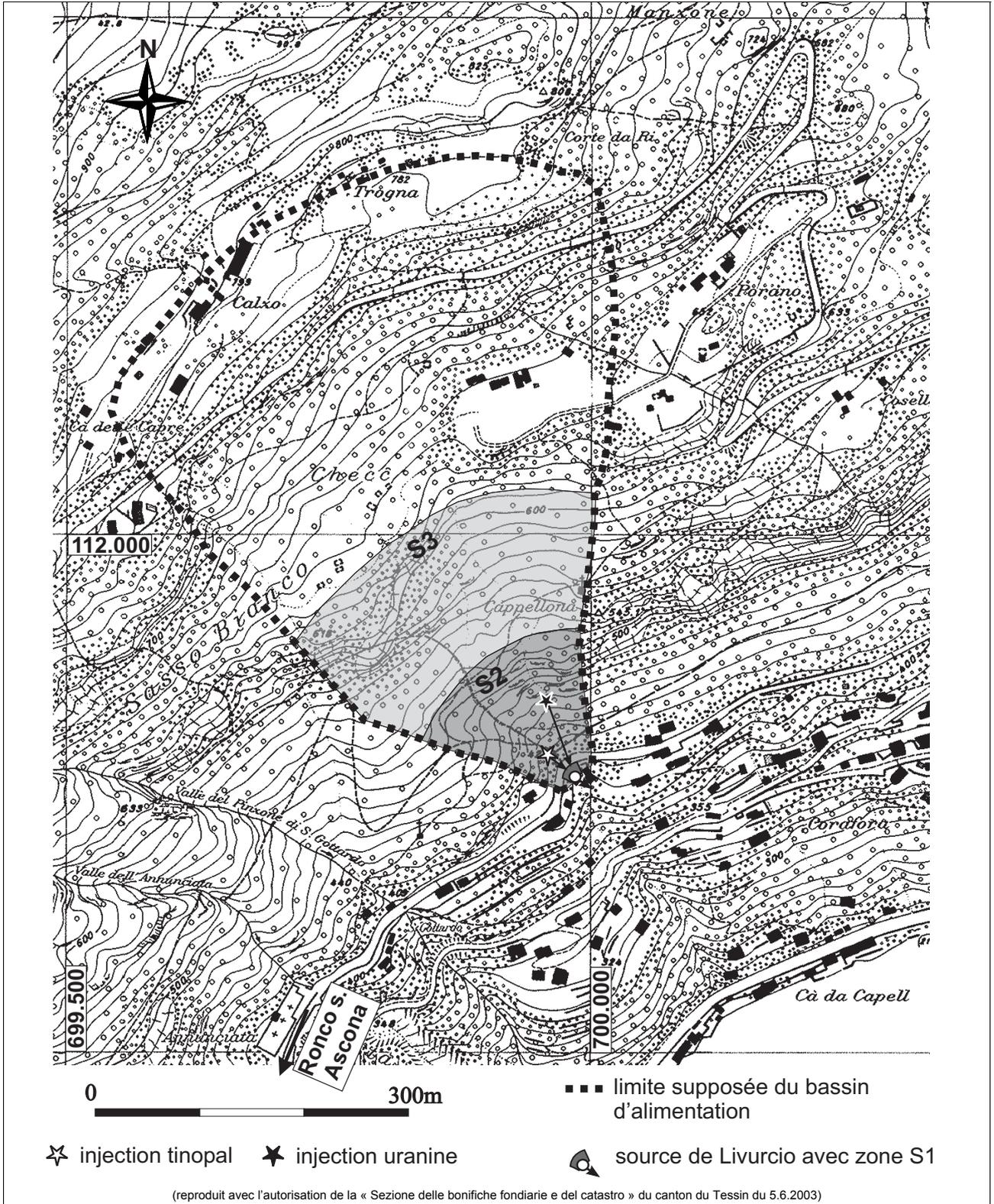


Figure 23: Délimitation des zones de protection selon la méthode des isochrones pour le site de Livurcio.

6.3 Rieden (SG) – Conglomérats, grès et marnes de la Molasse subalpine

Captages vulnérables,
milieu fortement hétérogène (cas b2),
méthode de cartographie multicritère de la
vulnérabilité « DISCO »

Introduction

La commune de Rieden (Canton de Saint-Gall) s'alimente en eau potable par l'intermédiaire de captages situés dans les grès et conglomérats de la Molasse subalpine. Des données concernant ces sources ont été acquises entre 1991 et 1993 dans le cadre d'une étude visant à délimiter les zones de protection (Grubenmann 1994). En raison de la très forte vulnérabilité des captages et des caractéristiques particulières de l'aquifère, une délimitation des zones de protection impliquant l'abandon des activités d'élevage sur le bassin d'alimentation des sources a été suggérée. Cette mesure ayant été considérée comme excessive par la commune de Rieden, des études supplémentaires ont été entreprises afin de trouver une solution permettant de concilier l'exploitation de l'eau potable et une activité d'élevage dans cette région.

Les bassins d'alimentation de deux captages (Marxenwald et Unter Howald, figure 24) ont été choisis comme sites de test dans le cadre du développement de ce guide pratique et ont fait l'objet d'une étude détaillée (Schaul 1999).

Données de base – évaluation de la vulnérabilité des captages

Caractéristiques des captages

La source de Marxenwald est captée à une profondeur de 4 à 5 mètres au fond d'une galerie bétonnée d'une longueur 8 mètres. Un bassin récolte les eaux provenant de deux fractures de la roche. De grandes quantités de graviers et de particules fines provenant de la dissolution des grès et des conglomérats s'accumulent dans le bassin et le captage doit être nettoyé régulièrement pour éviter une remise en suspension de ces particules lors des crues.

Le captage d'Unter Howald est de construction récente et en parfait état. L'eau est captée à l'aide de drains situés à une profondeur d'environ 4 mètres et est amenée dans une chambre en béton dont le bassin est équipé d'un turbidimètre. En raison de valeurs de turbidité élevées, cette source n'est toutefois utilisée qu'en étiage lorsque le débit des autres sources n'est plus suffisant pour alimenter le réseau communal.

Contexte géologique et hydrogéologique

L'aquifère est constitué par une alternance de grès, conglomérats et marnes de la Molasse d'eau douce inférieure (Habicht 1945). Ces couches ont été fortement fracturées et redressées (pendage de 20 à 60° vers le SSE) lors de l'orogénèse alpine (figure 24). La tectonique alpine s'est traduite au niveau régional par le développement de grands chevauchements («Tanzbodenaufschiebung», «Schorhüttenbergaufschiebung») d'orientation et de pendage subparallèles à ceux des couches. On retrouve cette famille de discontinuités au niveau local, de même que des plans subverticaux d'orientation ENE. Une troisième famille de plans à pendage d'environ 60° vers le WNW apparaît plus rarement (Schaul 1999).

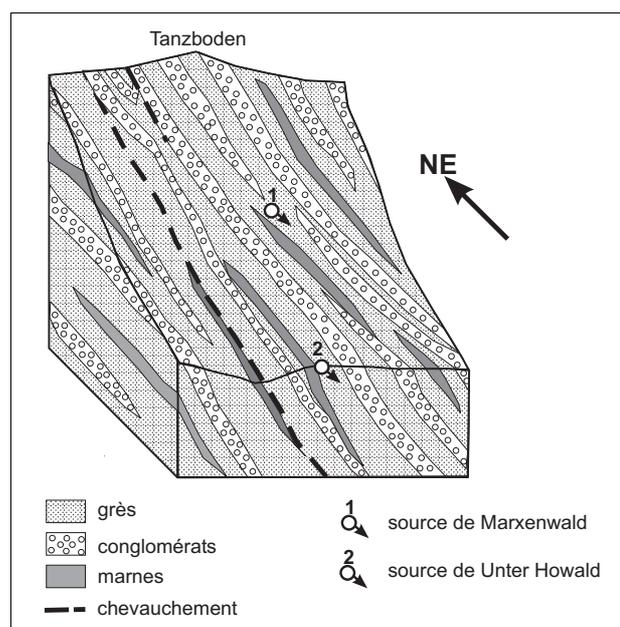


Figure 24: Bloc diagramme représentant schématiquement le contexte géologique du site de Rieden.

Les caractéristiques lithologiques de ces roches et la déformation alpine ont engendré le développement d'une porosité de fracture très importante. La dissolution du ciment calcaire des conglomérats et des grès, puis l'évacuation des éléments les moins solubles par érosion se traduit localement par une ouverture considérable des fractures (centimétrique). On note le développement d'une morphologie « karstique », avec la présence de nombreuses petites dolines (diamètre généralement compris entre un et deux mètres) qui s'alignent le long de structures tectoniques ou de limites de bancs (figure 25).

Il ne s'agit cependant pas réellement d'un système karstique comparable à ceux rencontrés dans les roches calcaires du Jura et des Alpes. La présence d'un grand nombre de sources de débit moyen inférieur à 500 l/min démontre l'existence de plusieurs petits aquifères indépendants. Même si la dissolution le long des plans de fractures est très importante, il n'y a probablement pas de réseau de conduits réellement organisé comme dans les systèmes karstiques bien développés. Contrairement aux karsts généralement rencontrés en Suisse, le ruissellement de surface est ici souvent abondant, en raison de la présence de niveaux marneux et de sols relativement peu perméables, liés à la forte teneur en argile des couches de la molasse.



Figure 25: Morphologie caractéristique de la région de Tanzboden (site de Rieden) avec alignement de petite dolines. (Photo A. Pochon)

Extension et limites du bassin d'alimentation

Un bilan approximatif permet d'estimer la lame d'eau infiltrée annuellement à environ 1100 mm ($P = 2000$ mm, $ETP = 400$ mm et R estimé à 25% des précipitations, soit 500 mm). Pour des débits moyens annuels de 400 et 500 l/min, les surfaces d'infiltration nécessaires à l'alimentation de ces deux sources sont respectivement de l'ordre de 0.2 et 0.25 km². Sur la base de critères topographiques, d'essais de traçages (Grubenmann 1994) et de la présence d'autres sources non captées, une surface d'environ 1 km² doit être considérée au total (figure 31).

Sources de pollution existantes et potentielles

Les seules sources potentielles de pollution sur le bassin d'alimentation sont liées à l'élevage de bovins de mai à octobre et au restaurant d'alpage de Tanzboden qui est ouvert toute l'année. Une dégradation de l'eau étant observée pendant la période d'estivage, c'est essentiellement l'activité d'élevage qui doit être considérée comme responsable de la dégradation bactériologique de la qualité de l'eau. Les problèmes de turbidité sont par contre strictement liés aux caractéristiques de l'aquifère.

Caractérisation globale de la vulnérabilité des captages

Un suivi mensuel des débits et conductivités pendant une année a montré l'extrême instabilité des sources de Marxenwald et Unter Howald (Grubenmann 1994). Les rapports des débits extrêmes sont de l'ordre de 25 (respectivement de 2000 à 85 et de 1500 à 65 l/min) et les fluctuations de la conductivité de l'ordre de 150 µS/cm. Une dégradation systématique de la qualité de l'eau apparaît dès le mois de juin (début de la période d'estivage du bétail) jusqu'au mois de novembre. La mauvaise qualité bactériologique et l'augmentation des teneurs en ammonium sont d'autant plus marquées lors des périodes de crue. Entre les mois de décembre et mai, la qualité de l'eau est par contre généralement conforme aux normes de potabilité, à l'exception des valeurs de turbidité qui sont fréquemment supérieures à la valeur de tolérance de 1 NTU. Ces eaux sont traitées avant d'être distribuées dans le réseau d'eau potable.

En conclusion, les données à disposition montrent clairement la forte vulnérabilité des deux captages aux pollutions (groupe b de la figure 7). Une étude complémentaire détaillée est indispensable dans un tel cas.

Données complémentaires – évaluation du degré d'hétérogénéité de l'aquifère

Zones d'infiltration préférentielle, caractéristiques des discontinuités

L'étude de la géomorphologie permet de mettre en évidence un grand nombre de petites dolines (environ 80 pour 0.7 km² de pâturages) qui agissent souvent comme points d'infiltration préférentielle, mais qui peuvent également être totalement colmatées. Ces dolines sont généralement regroupées par zones et sont fréquemment alignées le long de contacts lithologiques ou de structures tectoniques. En dehors de ces zones d'infiltration ponctuelle, il existe également de nombreux talwegs dont l'origine peut être attribuée à des structures tectoniques en profondeur, hypothèse attestée par quelques profils géophysiques (Schaul 1999). L'infiltration le long des talwegs est probablement moins concentrée, puisqu'une bonne partie des eaux de pluie ruissellent en surface et en subsurface le long de ces structures. Un grand nombre de cours d'eau permanents et temporaires longent ou recoupent fréquemment des discontinuités d'origine tectonique ou lithologique et doivent donc également être considérés comme des zones d'infiltration préférentielle. La disparition de ruisseaux sur quelques dizaines de mètres en période d'étiage laisse supposer une alimentation significative de l'aquifère par l'intermédiaire de ces pertes.

De manière générale, les affleurements montrent que les discontinuités sont fortement marquées par la dissolution.

Suivi détaillé des paramètres Q, T, C

Les sources de Marxenwald et d'Unter Howald ont fait l'objet de mesures en continu pendant les mois d'août, septembre et octobre 1999. Les variations de débit, température et conductivité sont très marquées et extrêmement rapides (figure 26). Le tarissement de ces

sources est excessivement rapide, puisqu'on note un retour au débit de base en moins d'un jour et demi pour la source de Marxenwald et en moins de quatre jours pour la source d'Unter Howald.

Cela implique qu'une très grande partie de l'eau infiltrée sur le bassin d'alimentation arrive au captage sans que des phénomènes significatifs d'auto-épuration aient pu intervenir. Ces réactions extrêmes peuvent être expliquées par une alimentation abondante à partir des zones d'infiltration préférentielle (ruissellement diffus, infiltration des cours d'eau) puis un transport rapide par l'intermédiaire d'un réseau de fractures très perméables.

Essais de traçage

Un essai par multitraçage (figure 31) a été effectué dans le cadre de l'étude des zones de protection de la commune de Rieden (Grubenmann 1994). Les cinq traceurs injectés ont permis de montrer que les bassins d'alimentation des deux sources (et d'autres sources voisines) sont indépendants, probablement compartimentés par les alternances lithologiques (niveaux marneux) et les chevauchements majeurs. Les vitesses déterminées lors de cet essai (300 à 1500 mètres/jour) ont montré la présence de zones vulnérables très éloignées des captages.

Degré d'hétérogénéité de l'aquifère

Au vu de la forte vulnérabilité des captages et de la forte hétérogénéité de l'aquifère, seule une approche par cartographie multicritère de la vulnérabilité peut permettre une délimitation des zones de protection prenant en considération les caractéristiques spécifiques de cet aquifère (cas b2 de la figure 7). Le fait que la plus grande partie des eaux souterraines réside très peu de temps dans l'aquifère avant d'être captée rend délicate la coexistence d'une activité d'élevage intensive sur le bassin d'alimentation des sources avec l'exploitation d'une eau de bonne de qualité pendant la période de mai à octobre. La cartographie de la vulnérabilité peut cependant permettre de distinguer les zones relativement peu sensibles aux impacts anthropogènes des zones particulièrement vulnérables aux pollutions.

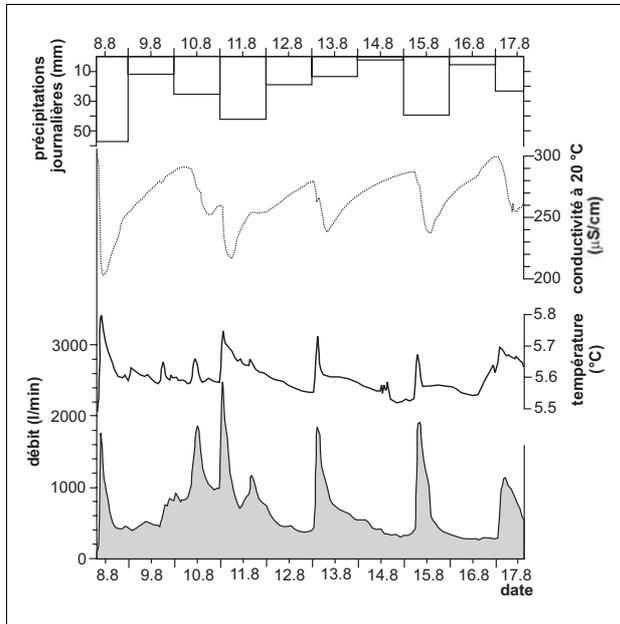


Figure 26: Hydrogramme de la source de Marxenwald pour la période du 8 au 17 août 1999 (d'après Schaul 1999).

Application de la méthode « DISCO » pour la délimitation des zones de protection

Bien que l'aquifère présente une certaine karstification, la méthode EPIK, développée spécifiquement pour les aquifères karstiques du Jura et des Alpes calcaires n'est pas utilisable dans ce contexte. La présence de nombreux secteurs peu perméables et non karstifiés (marnes, sols argileux) induisant par ruissellement des transferts latéraux importants de polluants vers les zones d'infiltration préférentielles n'est pas prise en compte de manière satisfaisante par la méthode EPIK. La méthode de cartographie « DISCO », développée spécifiquement pour la délimitation des zones de protection des captages en milieu fissuré fortement hétérogène doit être appliquée ici :

Paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice » (figures 27 et 28)

L'évaluation du paramètre « discontinuités » a été réalisée essentiellement sur la base d'une cartographie géomorphologique. Les essais de traçage (Grubermann 1994), quelques profils géophysiques (VLF-em), ainsi que des observations en période de fortes précipitations

ont permis de justifier l'attribution des différents indices (figure 27).

La classe D_0 a été attribuée aux dolines ou groupes de dolines bien développées agissant comme points d'infiltration préférentielle. D'autres discontinuités supposées en relation hydraulique très rapide avec les captages ont également été cartographiées selon cet indice (talweg et cours d'eau infiltrants situés à faible distance des captages).

La classe D_1 a été attribuée à l'ensemble des structures supposées en relation hydraulique rapide avec les captages (dépressions peu développées, talwegs et cours d'eau liés à des discontinuités).

La classe D_2 a été attribuée au reste du bassin, caractérisé par l'absence de structures géomorphologiques. L'ensemble de l'aquifère paraissant fortement fracturé, la classe D_3 n'a pas été attribuée.

L'évaluation du paramètre « couverture protectrice » a été effectuée grâce à une cartographie des sols (P_0 à P_3), essentiellement sur la base de sondages à la tarière et de quelques essais d'infiltration (figure 28). Dans les zones de forêt, une cartographie détaillée de la couverture n'a pas été effectuée. De manière générale, les sols y sont moins épais et plus perméables que dans les zones de pâturage. Les talwegs et lits des cours d'eau laissent le plus souvent apparaître la roche affleurante. Par simplification, l'ensemble de la zone de forêt a été cartographiés en P_1 , sauf les lits des cours d'eau et les talwegs qui ont été cartographiés en P_0 . Les conditions locales n'ont pas conduit à l'attribution de P_4 .

« Facteur de protection intermédiaire » (figure 29)

La carte du facteur de protection intermédiaire met en évidence la vulnérabilité très élevée (facteur de protection très faible) des dolines et groupes de dolines protégées par une faible couverture protectrice, et des talwegs et lits des cours d'eau situés à faible distance des captages. Les dolines recouvertes d'une bonne couverture protectrice et la majorité des talwegs et dépressions géomorphologiques sont caractérisées par un facteur de protection faible. La plus grande partie du bassin d'alimentation est caractérisée par un fac-

teur de protection moyen (lié à l'absence de structures géomorphologiques et à la présence d'une couverture protectrice significative). Seules de rares zones protégées par une couverture protectrice épaisse et peu perméable apparaissent avec un facteur de protection élevé.

« **Facteur de protection final** » (figure 30)

En raison du ruissellement abondant (sol relativement peu perméable et fortes pentes) les surfaces alimentant les zones les plus vulnérables sont assez étendues. La carte du facteur de protection final montre donc une relativement grande proportion de surfaces caractérisées par des facteurs de protection très faibles et faibles.

Délimitation des zones S (figure 31)

La carte du facteur de protection final sert de base pour délimiter les zones de protection (contours hydrogéologiques), moyennant les ajustements suivants:

- les zones S3 apparaissant à une distance inférieure à 100 mètres de chaque captage ont été converties en zones S2,
- la géométrie des zones S2 et S3 a été simplifiée afin de faciliter leur application,
- les rares petites surfaces caractérisées par un facteur de protection élevé ont été assimilées à des zones S3,
- dans le cas de Rieden, une zone S1 d'extension de 30 mètres a, de plus, été délimitée en amont des captages, en raison de la grande probabilité que des fractures d'extension locale soient directement reliées aux deux captages.

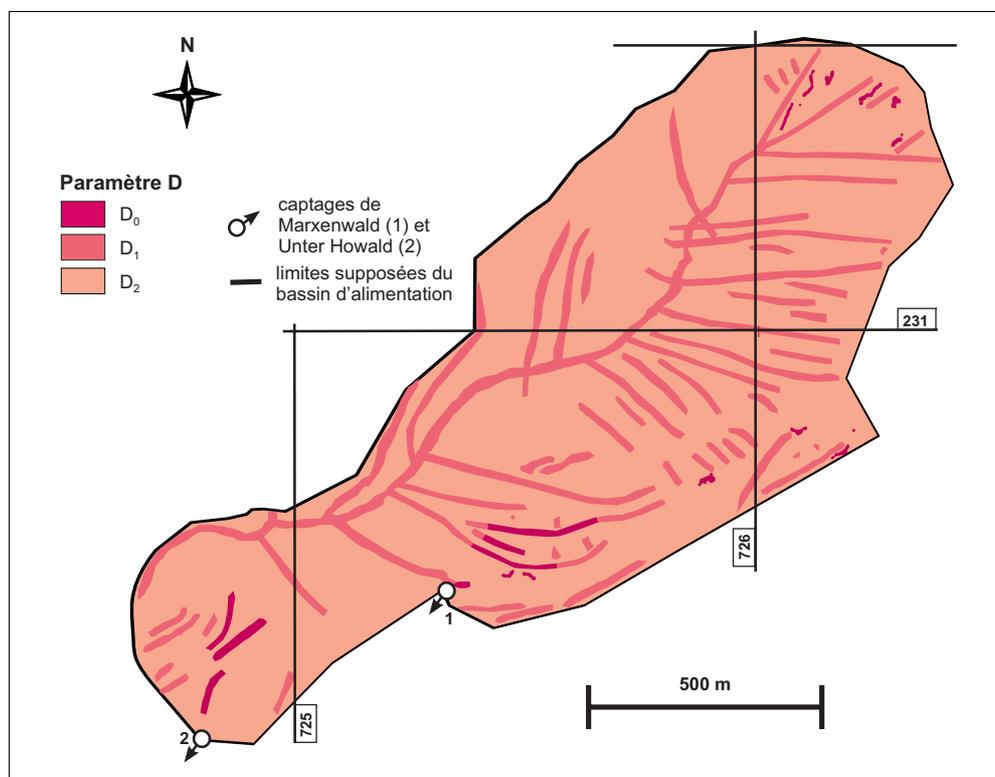


Figure 27:
Site de Rieden, carte du paramètre « discontinuités ».

Figure 28:
Site de Rieden, carte du
paramètre « couverture
protectrice ».

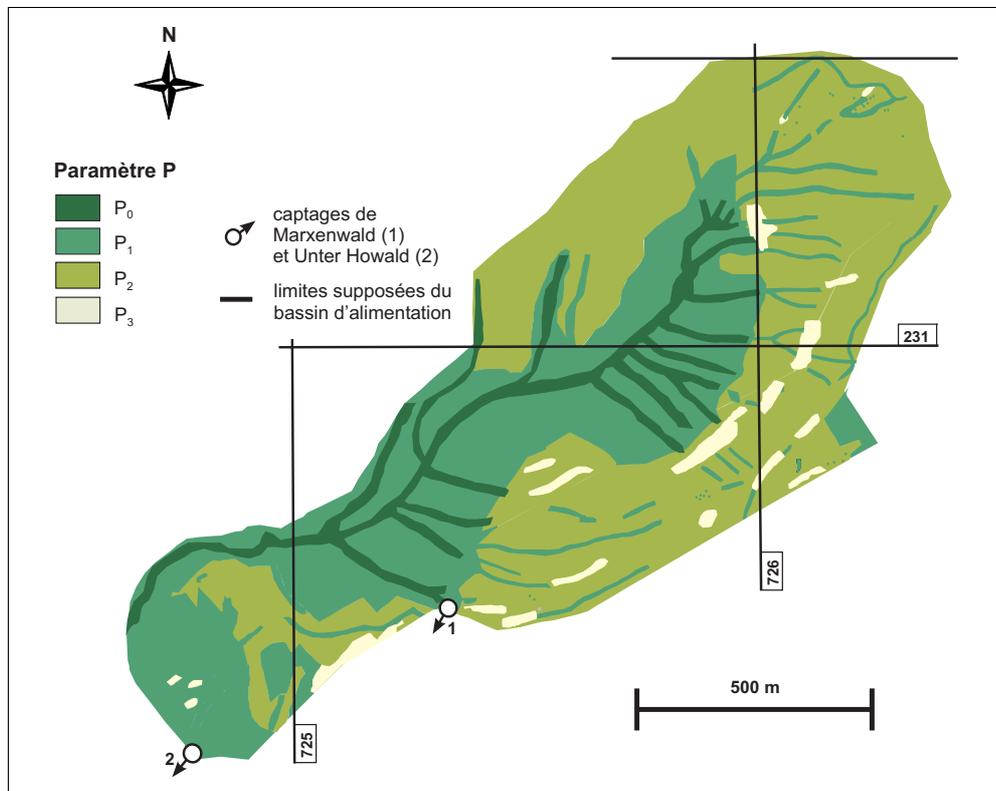
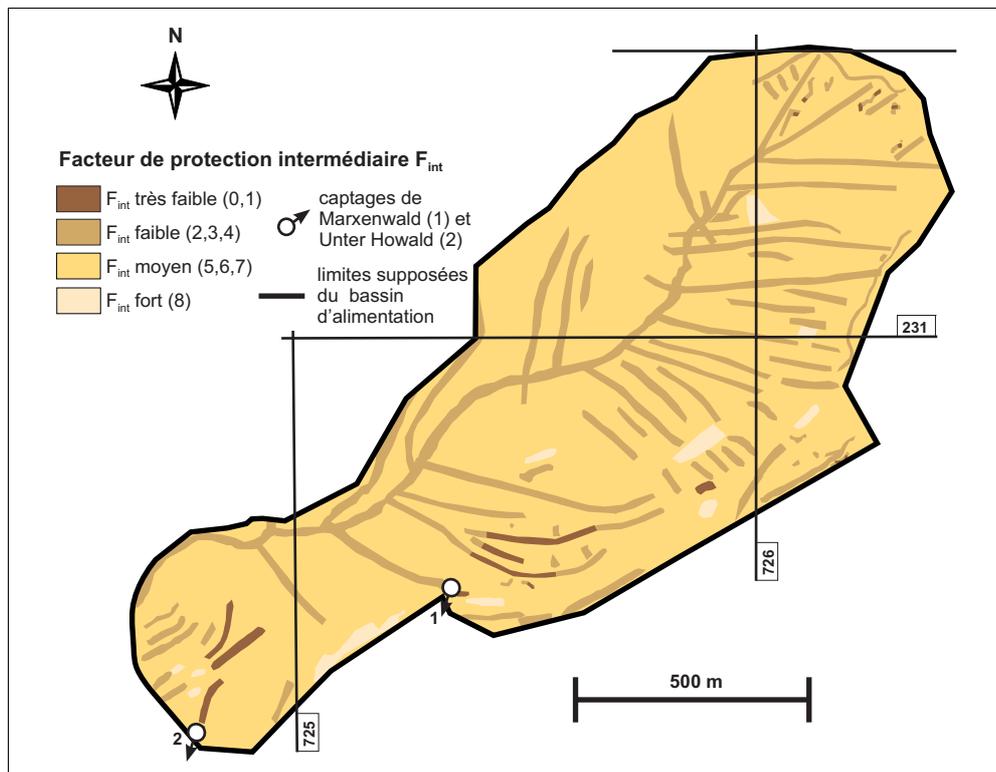


Figure 29:
Site de Rieden, carte du
« facteur de protection
intermédiaire ».



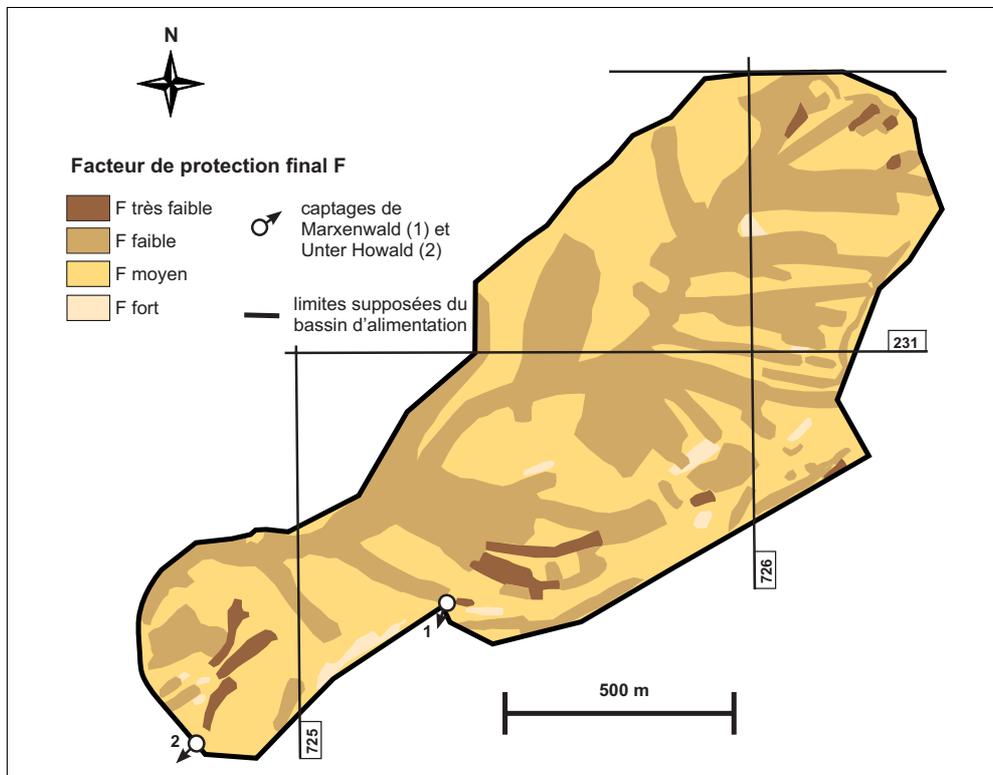


Figure 30:
Site de Rieden, carte du « facteur de protection final ».

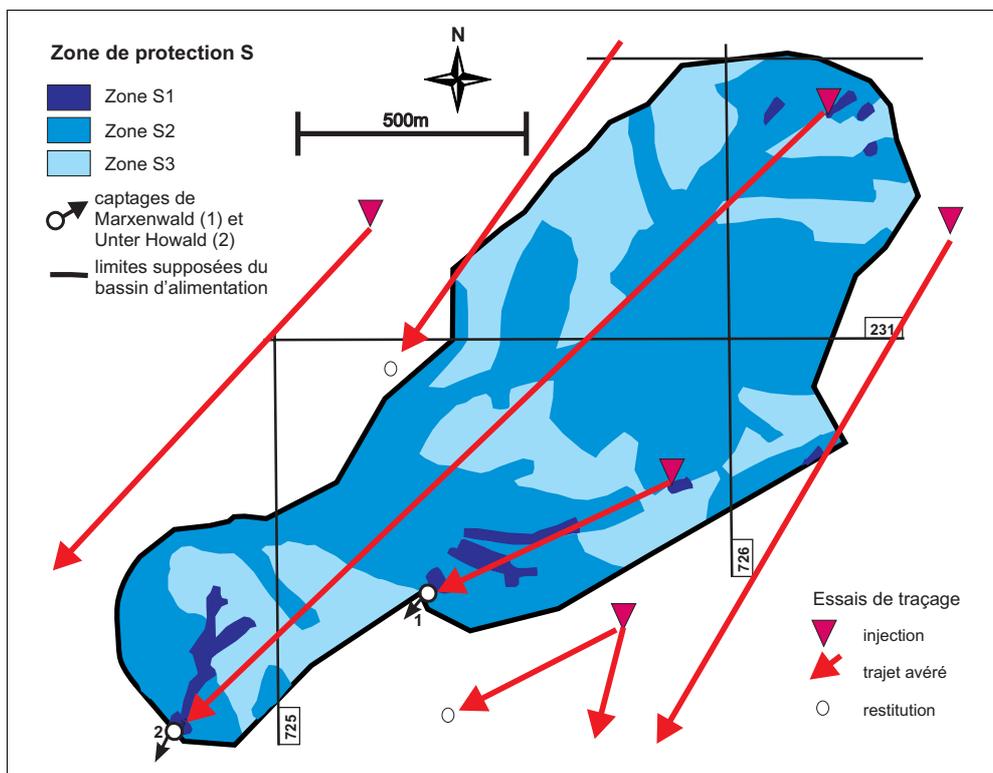


Figure 31:
Site de Rieden, délimitation des zones S (contours hydrogéologiques).

6.4 Wyssberg (BE) – Grès et schistes du flysch de la nappe du Niesen

Captages vulnérables, milieu fortement hétérogène (cas b2), méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité « DISCO »

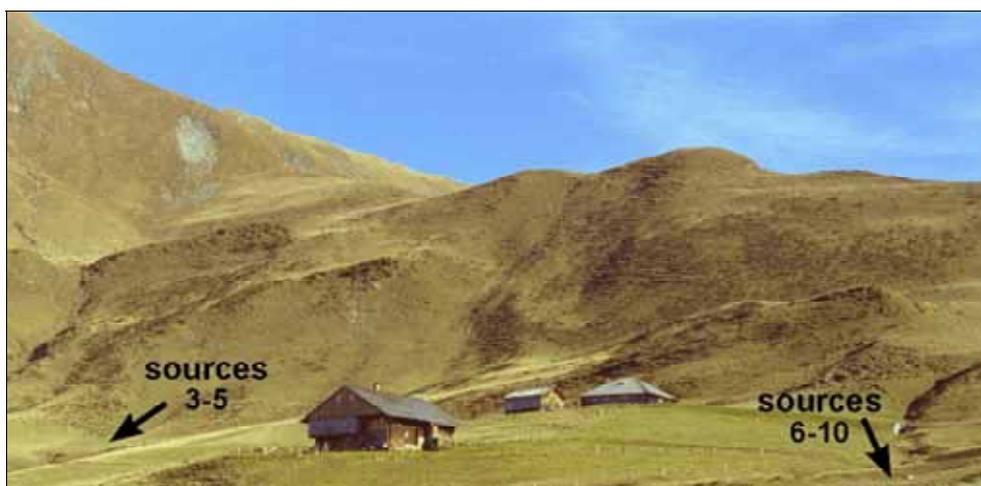


Figure 32:
Situation des sources de la région de Wyssberg.
(Photo A. Pochon)

Introduction

Une quinzaine de sources sont captées dans la région de Wyssberg dans le Simmental (Canton de Berne). Elles alimentent les petites agglomérations de Bleiken (commune de La Lenk) et Obersteg (commune de St-Stephan). Les bassins d'alimentation de deux groupes de sources (n° 3, 4, 5 et n° 6, 7, 8, 9, 10, figures 32 et 33) sont distingués. Les zones de protection ayant déjà été définies dans cette région (CSD 1985), ce chapitre propose une délimitation des zones S selon la nouvelle démarche méthodologique, à titre de comparaison.

Données de base – évaluation de la vulnérabilité des captages

Caractéristique des captages

Les captages n° 3, 4, 5 sont situés à une altitude comprise entre 1910 et 1920 mètres. Ils sont alignés sur une trentaine de mètres en bordure d'un talweg et captent essentiellement l'eau provenant des fissures du flysch par l'intermédiaire de drains situés à une profondeur de l'ordre de 2 mètres. Des apports d'eau circulant dans la couche d'altération des grès à faible profondeur contribuent probablement à l'alimentation des captages. Les eaux sont collectées dans deux chambres (chambre commune pour les sources 3 et 4), où il est possible de jauger le débit à l'aide d'un seau.

Le deuxième groupe de sources (n° 6, 7, 8, 9, 10) est situé à une altitude comprise entre 1890 et 1900 mètres. L'eau est également captée par des drains situés à faible profondeur dans la roche fissurée et altérée.

L'ensemble de ces sources a été recapté en 1984 et les chambres sont en bon état. Un léger dépôt de sable et de particules fines laisse supposer la présence d'une certaine turbidité en période de crue.

Contexte géologique et hydrogéologique

La région de Wyssberg (figure 33) est située dans les séries inférieures du Flysch du Niesen (Furrer et al. 1993) qui sont essentiellement constituées par une alternance de schistes et grès à ciment calcaire.

Les couches sont localement plissées mais on observe un pendage général de la stratification d'environ 30° en direction du nord. Deux familles principales de fractures subverticales d'orientation N310 et N-S apparaissent tant au niveau de l'affleurement qu'au niveau régional (photogéologie). Ces structures régionales semblent jouer un rôle hydrogéologique considérable puisque deux groupes de source s'alignent sur deux fractures orientées N310.

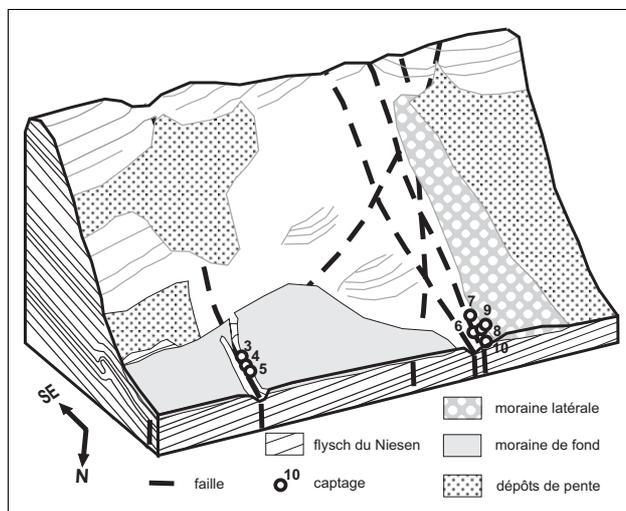


Figure 33: Bloc diagramme représentant schématiquement la géologie du site de Wyseberg.

La roche fissurée est souvent recouverte d'une couche de sol d'une épaisseur maximum d'un mètre, composée d'un horizon de sol brun (10 à 20 cm) surmontant un horizon riche en limon et argiles (0 à 70 cm). La partie supérieure de la roche est généralement altérée et décalcifiée sur plusieurs décimètres. Les grès apparaissent alors poreux et friables et les schistes très plastiques. On note localement, dans la partie inférieure de la zone étudiée (voir figure 33), la présence d'une moraine de fond d'une épaisseur inférieure à 1 mètre contenant de nombreux blocs de grès altérés de taille centimétrique à décimétrique dans une matrice très argileuse. A l'ouest de la zone considérée, un dépôt de moraine latérale d'une épaisseur de plusieurs mètres est localisé en amont du deuxième groupe de sources (n° 6 à 10). Des dépôts de pente apparaissent également en de nombreux endroits.

Extension et limites du bassin d'alimentation

Un calcul prenant en considération 1900 mm de précipitations, 350 mm d'évapotranspiration et 850 mm de ruissellement implique une infiltration efficace de l'ordre de 700 mm par année. La prise en considération d'un coefficient de ruissellement élevé se justifie par la faible perméabilité des couches de couverture et l'accumulation d'une grande quantité de neige d'octobre à avril, dont la majeure partie est évacuée par

ruissellement au printemps. En considérant un débit moyen de 60 l/min pour l'ensemble des sources 3, 4, et 5, la taille du bassin d'alimentation doit être de l'ordre de 0,05 km². Le bassin doit s'étendre approximativement jusqu'à la ligne de crête située 300 à 400 mètres en amont. L'extension approximative du bassin d'alimentation du deuxième de groupe de source (6, 7, 8, 9, 10) est de l'ordre de 0,12 km² en considérant un débit de l'ordre de 160 l/min.

Sources de pollution existantes et potentielles

Les risques de pollution sont limités à l'élevage de bovins et au purinage pendant la période de juin à septembre. Les fumures sont cependant uniquement épandues sur les zones peu escarpées et faciles d'accès dans la partie inférieure du bassin d'alimentation. Les étables sont situées en aval des captages 3, 4, 5, et ne constituent donc pas un facteur de risque pour ce groupe de sources. Le deuxième groupe de sources est plus exposé aux contaminations puisqu'il se trouve à quelques dizaines de mètres en aval de la route goudronnée (passage de quelques véhicules et déplacement du bétail) et également à faible distance des étables.

Caractérisation globale de la vulnérabilité des captages

En raison d'un accès difficile, seules des données réparties sur une période restreinte de l'année sont disponibles (avril-décembre). Des variations importantes des débits ont été observées dans le cadre de la délimitation des zones de protection (CSD 1985). Les débits minimums à la fin de l'hiver sont de l'ordre de 20 l/min au total pour les sources 3, 4 et 5, alors que les débits maximums sont supérieurs à 200 l/min. Des fluctuations significatives (2 à 5°C) des températures de l'eau au cours de l'année montrent que l'aquifère est peu profond. Les conductivités à 25°C varient également de manière significative de 290 à 380 µS/cm (CSD 1985; Basabe-Rodriguez 1993; présent travail), démontrant la sensibilité des captages aux variations des conditions hydrologiques. Le deuxième groupe de sources (n° 6 à 10) n'a pas fait l'objet de mesures régulières dans le cadre de l'application de la démarche méthodologique, mais les données à disposition montrent également un comportement instable (débits

compris entre 40 et 400 l/min pour l'ensemble des sources). Un nombre limité d'analyses bactériologiques est disponible pour les sources de Wyssberg. Bien que les prélèvements aient été réalisés en novembre ou décembre, deux à trois mois après le départ du bétail, la présence de germes (> 20 par ml) et de quelques *Escherichia coli* par 100 ml a été observée dans des captages appartenant aux deux groupes de sources. Un échantillonnage effectué pendant la période d'estivage donnerait probablement de plus mauvais résultats en raison de la présence de bétail à faible distance des sources.

En conclusion, les données à disposition démontrent la vulnérabilité des captages et la nécessité d'obtenir des données complémentaires (groupe b de la figure 7).

Données complémentaires – évaluation du degré d'hétérogénéité de l'aquifère

Zones d'infiltration préférentielle, caractéristiques des discontinuités

Aucune doline ou point d'infiltration préférentielle n'apparaît dans la géomorphologie mais l'étude des photos aériennes révèle la présence de structures sub-verticales d'orientation N310 et N-S qui déterminent la position des deux zones de résurgence. Ces deux familles de discontinuités apparaissent également à l'échelle de l'affleurement et doivent, avec les plans de stratification, contrôler l'écoulement dans l'aquifère fissuré.

D'autres dépressions géomorphologiques sont également mises en évidence par photogéologie et doivent être considérées comme des structures potentiellement perméables.

Des phénomènes de dissolution s'observent le long des plans de discontinuités et sont également responsables d'une décalcification des couches à proximité de la surface. L'effet de la dissolution est donc d'une part de créer une porosité d'interstice dans les couches gréseuses et d'autre part de favoriser les écoulements rapides le long des discontinuités par une augmentation de la perméabilité de fissures. La présence de fractures d'ouverture centimétrique est observée le long des lits des cours d'eau (figure 34).

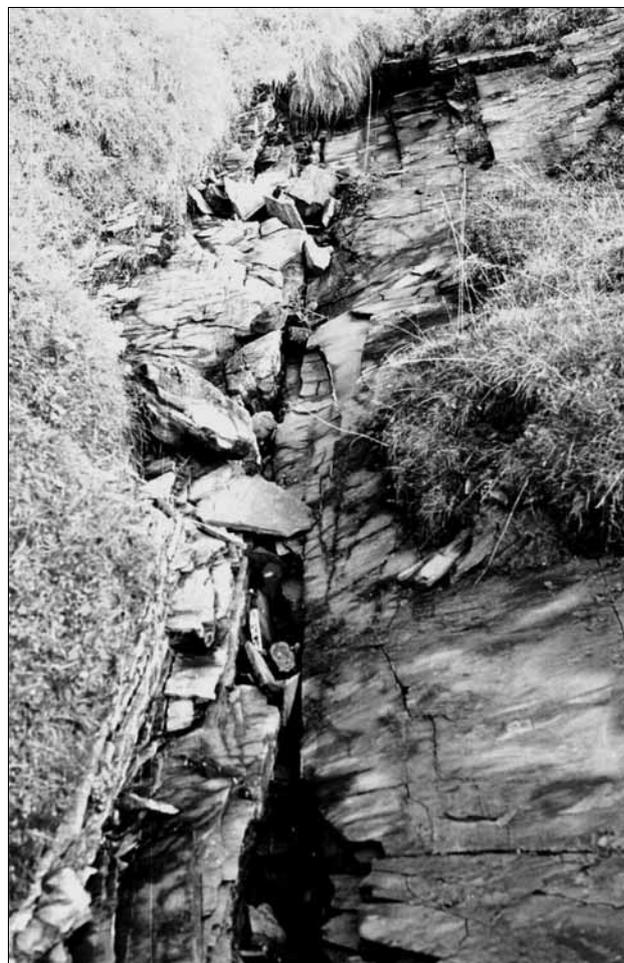


Figure 34: Fracture d'ouverture centimétrique le long d'un cours d'eau du site de Wyssberg. (Photo A. Pochon)

Suivi détaillé des paramètres Q, T, C

Des données de débit, de température et de conductivité en continu n'ont pas pu être collectées en raison de l'impossibilité d'installer un déversoir dans les chambres de captage.

Essais de traçage

Des essais de traçage ont été réalisés en décembre 1984 en amont des deux zones de résurgence considérées (CSD 1985).

Pour le groupe de sources n° 3, 4, 5, l'injection de fluorescéine a été effectuée directement dans les fissures du flysch dans une fouille d'une profondeur proche de 2 mètres, située à 25 mètres en amont du captage n° 3. Les vitesses déterminées sont de l'ordre de 25 m/h (600 m/j). Pour le groupe de sources n° 6 à 10, deux traceurs ont également été injectés en fouille. Le premier 30 mètres en amont de la source n° 7 (rhodamine), le second 20 mètres en amont de la source n° 9 et 60 mètres en amont de la source n° 10 (fluorescéine). Les vitesses déterminées sont de 480 m/j vers le captage n° 7 et de respectivement 72 et 48 m/j vers les captages n° 9 et n° 10.

Relevons que l'injection en fouille de plusieurs m³ d'eau à très faible distance du captage est à même de créer des gradients supérieurs et donc des vitesses supérieures à celles observées en conditions hydrologiques naturelles.

Degré d'hétérogénéité de l'aquifère

Les vitesses très élevées déterminées par traçage (50 à 600 m/j) démontrent l'existence de circulations rapides dans le substratum fissuré, qui doivent être expliquées par des écoulements préférentiels le long de fractures de forte perméabilité. L'aquifère doit être considéré comme fortement hétérogène (cas b2 de la figure 7) et c'est donc la méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité « DISCO » qui doit être appliquée dans ce cas.

Application de la méthode « DISCO » pour la délimitation des zones de protection

Paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice » (figures 35 et 36)

L'évaluation du paramètre « discontinuités » (photos aériennes, terrain) permet de mettre en évidence des structures d'extension hectométrique qui déterminent l'emplacement des deux zones de résurgence. L'indice

D₁ a été attribué aux structures majeures sur une largeur de 20 à 30 mètres pour tenir compte de l'influence d'une forte fracturation de part et d'autre du plan de faille. Le reste du bassin d'alimentation a été cartographié en D₂ de manière à tenir compte d'un réseau relativement dense de fractures de plus faible extension.

Des essais d'infiltration réalisés en amont des sources n° 3, 4, 5 dans une zone recouverte de sol et de moraine de fond ont confirmé la faible perméabilité des couches de couverture (k compris entre 1•10⁻⁶ m/s et 1•10⁻⁷ m/s).

Les classes P₀, P₁, et P₂ ont été attribuées lorsque la roche fissurée est affleurante (P₀) ou recouverte uniquement de sol (P₁ ou P₂ suivant l'épaisseur) et la classe P₃ en cas de présence cumulée de sol et d'une épaisseur significative de moraine de fond (entre 50 et 100 cm). La zone recouverte de plusieurs mètres de moraine latérale est relativement riche en blocs de grès altérés de bonne perméabilité, elle a été également cartographiée en P₃. Les dépôts de pente apparaissent le plus souvent en P₂, parfois en P₃ lorsque l'épaisseur de la couverture protectrice est clairement supérieure à 1 mètre.

« Facteur de protection intermédiaire » (figure 37)

Les grandes fractures protégées par une couverture d'une épaisseur inférieure à 1 mètre sont caractérisées par un facteur de protection faible de même que les autres parties du bassin d'alimentation où la roche fissurée est affleurante ou subaffleurante (couverture inférieure à 20 cm).

« Facteur de protection final » (figure 38)

En raison de la présence d'une couverture protectrice peu perméable sur une grande partie du bassin d'alimentation, le ruissellement diffus est relativement abondant. Un facteur de protection final faible doit donc être attribué aux pentes alimentant par ruissellement les secteurs les plus vulnérables.

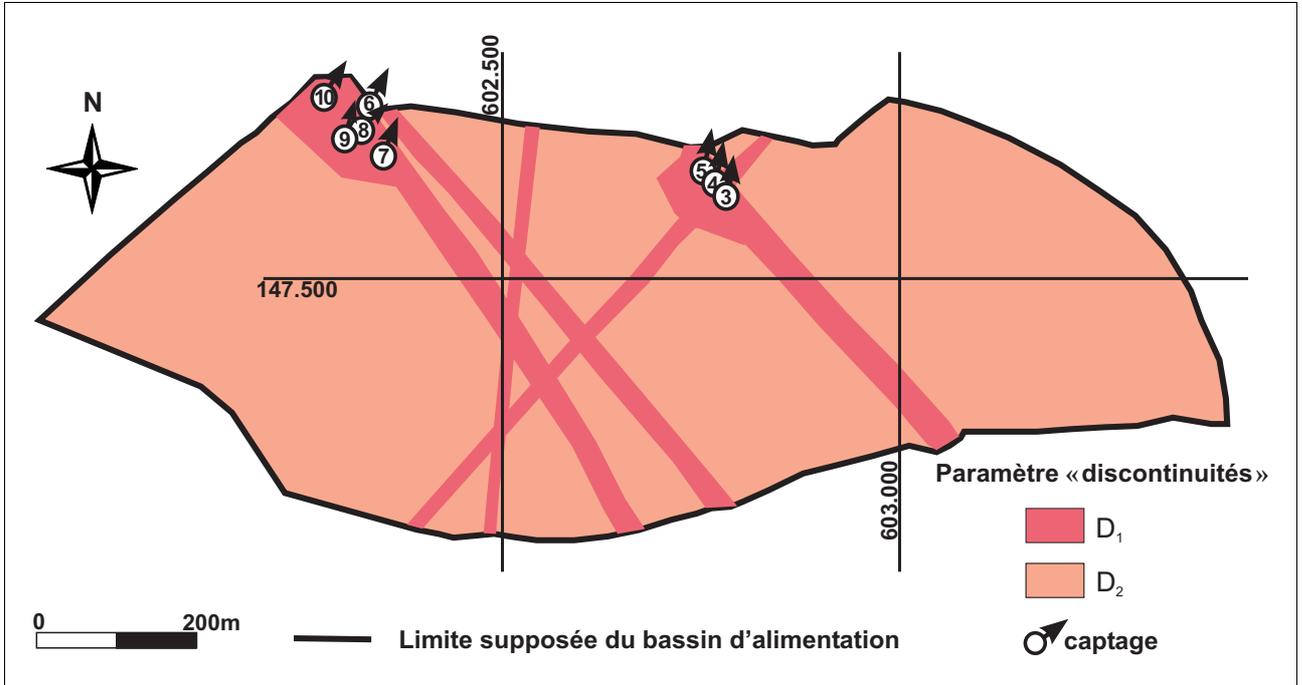


Figure 35: Site de Wyseberg, carte du paramètre « discontinuités ».

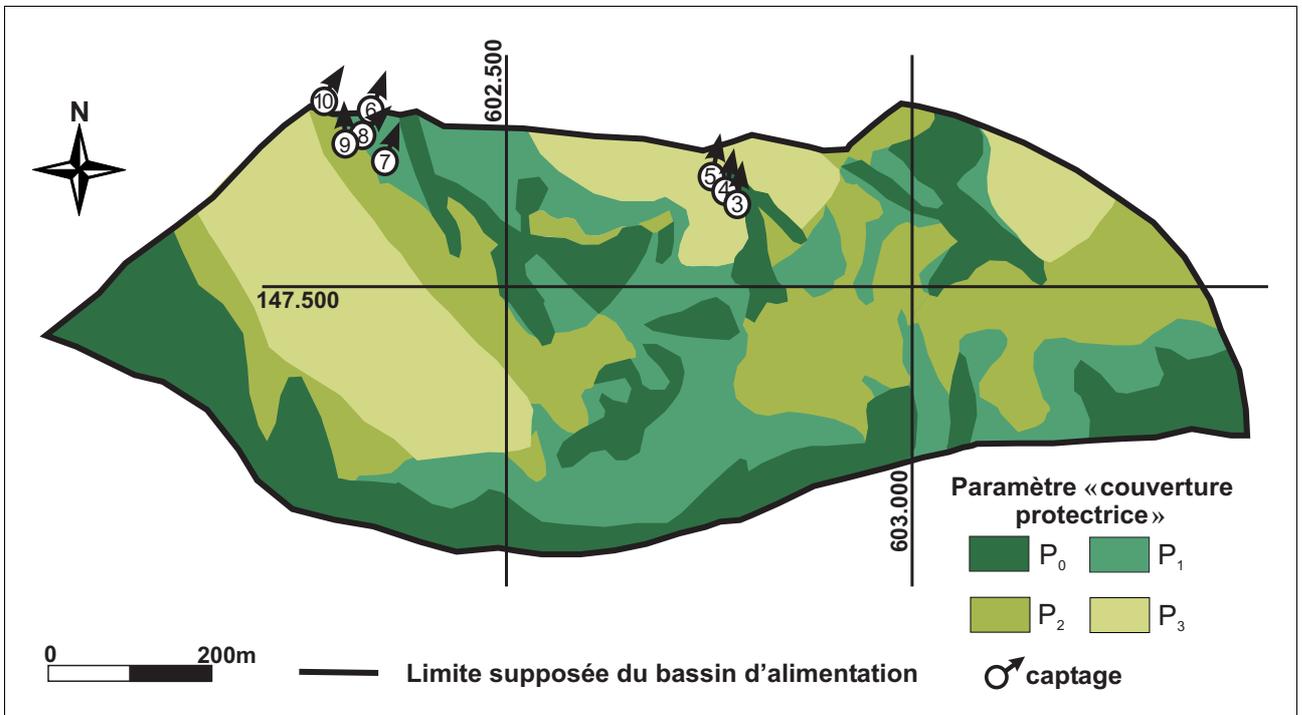


Figure 36: Site de Wyseberg, carte du paramètre « couverture protectrice ».

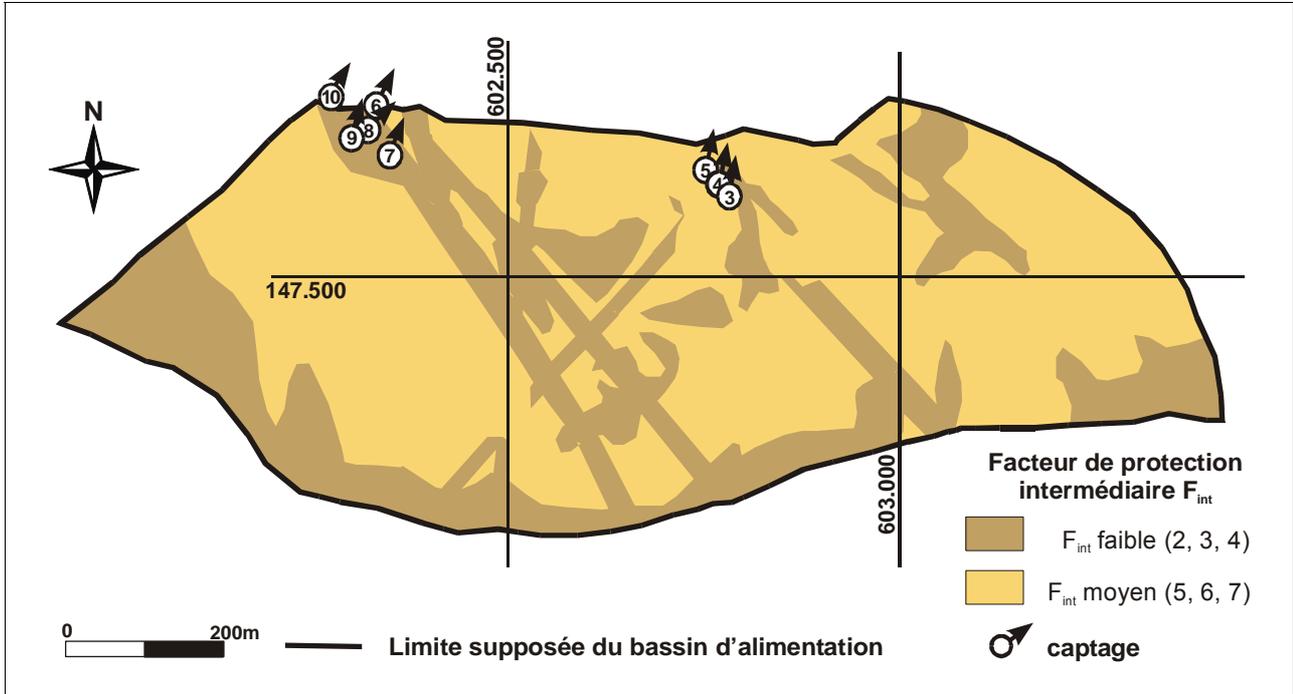


Figure 37: Site de Wyssberg, carte du « facteur de protection intermédiaire ».

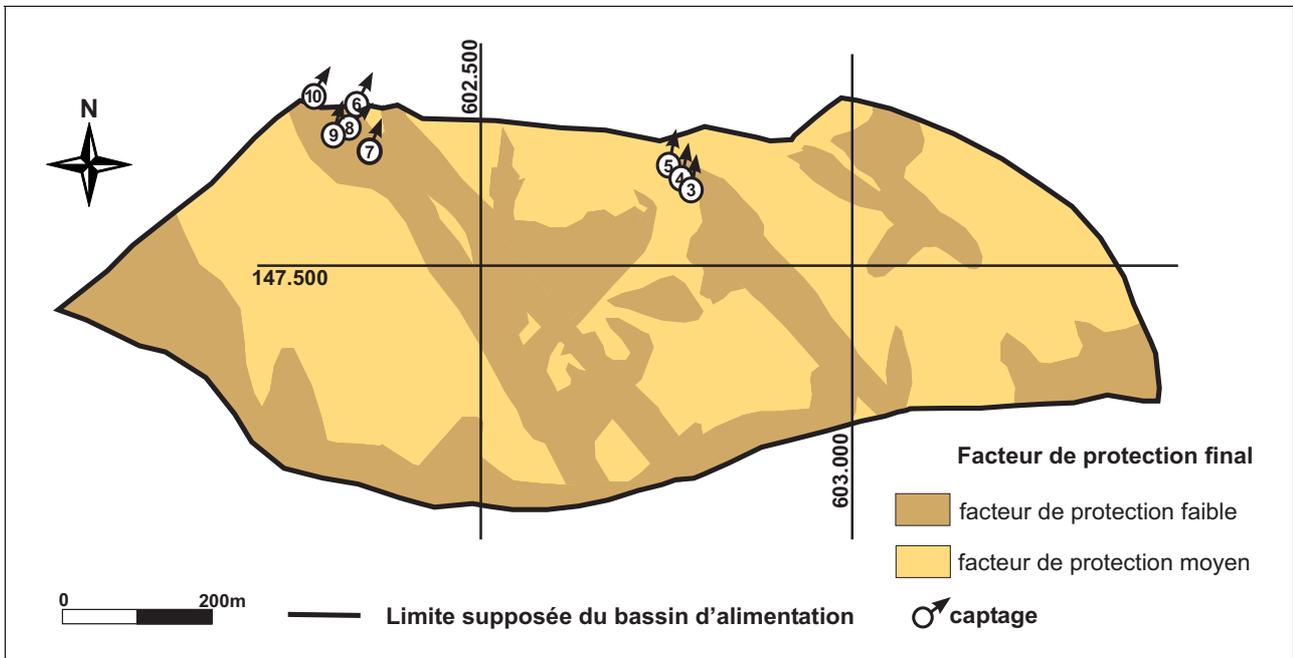


Figure 38: Site de Wyssberg, carte du « facteur de protection final ».

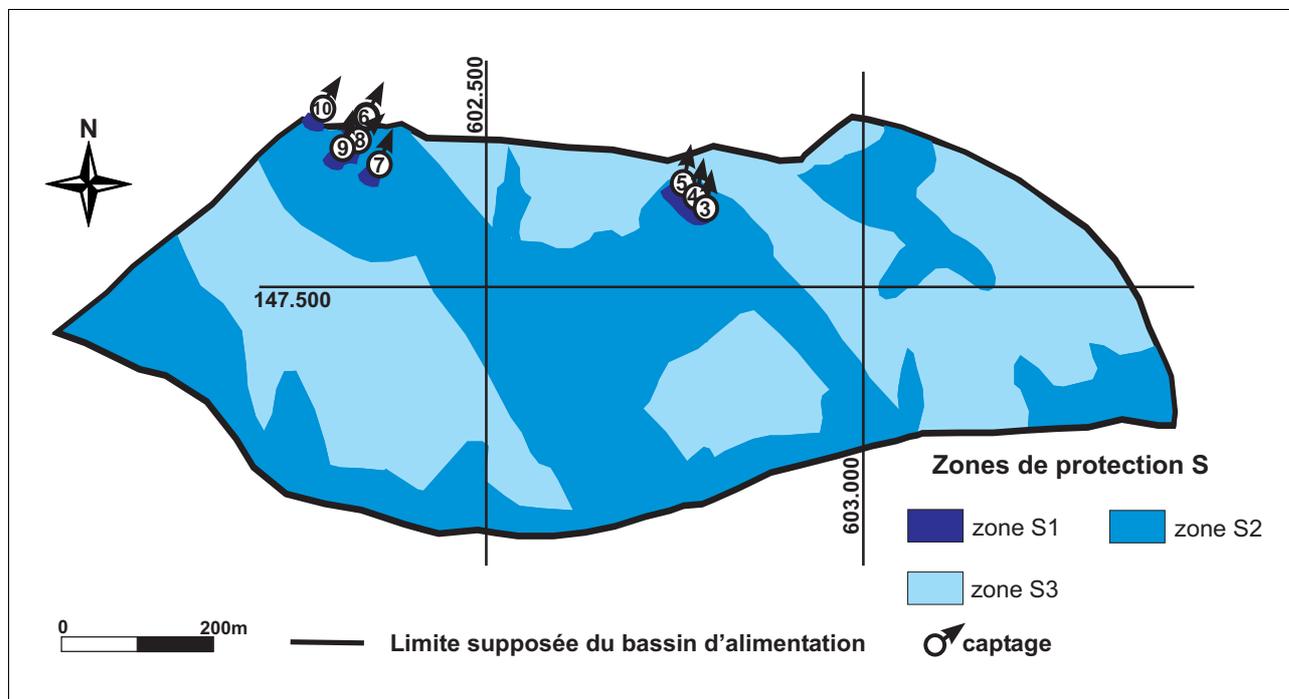


Figure 39: Site de Wysseberg, délimitation des zones S (contours hydrogéologiques).

Délimitation des zones S (figure 39)

Des zones S1 d'une extension de 25 mètres ont été définies en amont des captages de manière à inclure les drains dont la position exacte n'est pas connue et afin de tenir compte du ruissellement en direction de l'ouvrage (pente de l'ordre de 10 à 20%). Pour les sources n° 3, 4, 5 et 6, 8, 9, une zone S1 commune est proposée en raison du faible éloignement des captages (20 à 30 mètres). Le reste du bassin d'alimentation est attribué, selon la classe de vulnérabilité, aux zones S2 et S3. Il est à souligner qu'aucune zone S3 n'est définie à moins de 100 mètres des captages. Pratiquement, ceci a essentiellement pour conséquence d'exclure la possibilité d'épandage de fumure liquide à faible distance en amont du groupe de sources 3, 4, 5.

Comparaison avec les zones de protection existantes

Lors de la délimitation des zones de protection en 1985, la présence d'une couverture protectrice de faible perméabilité avait été jugée suffisante pour ne pas définir de zones S2. L'ensemble du bassin d'alimentation des sources avait été mis en S3 au-delà des zones de protection rapprochée des captages (S1). La carte du paramètre P (figure 36) montre cependant que la répartition de la couverture protectrice est très hétérogène. De plus l'épaisseur cumulée du sol et de la moraine est inférieure à deux mètres, sauf pour les zones recouvertes de moraine latérale. Les vitesses observées dans le flysch fissuré étant particulièrement élevées (50 à 600 m/j), il est indispensable de cartographier la couverture protectrice de manière rigoureuse. L'application de la méthode « DISCO » permet donc dans un tel cas de définir des zones de protection plus efficaces.

6.5 Cas particuliers

Les particularités du fonctionnement hydrogéologique de certains milieux fissurés et leur implication sur la délimitation des zones de protection sont présentées brièvement dans le cadre de ce chapitre. Ces observations sont basées sur l'étude de divers sites examinés dans le cadre du développement de la démarche méthodologique. Quelques exemples illustrent également des situations dans lesquelles l'applicabilité des méthodes proposées est limitée, et dans lesquelles l'hydrogéologue doit faire preuve de discernement.

6.5.1 Aquifères fissurés fortement décomprimés et zones instables

Les phénomènes de décompression conditionnent la perméabilité des massifs cristallins dans les premières dizaines à centaines de mètres à partir de la surface (Avias 1982, Cruchet 1985, Maréchal 1998). Ils sont plus ou moins marqués selon le type de roche, la tectonique (schistosité, fracturation), les effets de décompression post-glaciaire (exfoliation) et la topographie (appel au vide). Les zones fortement décomprimées sont souvent instables et possèdent des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques particulières. Les phénomènes de fauchage, tassement et glissement sont fréquents et les écoulements d'eau souterraine sont imprévisibles et localement rapides. Bien que ces milieux soient souvent caractérisés par une forte hétérogénéité, une cartographie multicritère de la vulnérabilité n'est pas toujours applicable en raison de la difficulté d'évaluer l'hétérogénéité du massif rocheux par des observations réalisées en surface.

Exemple 1: La Roche (FR)

Région de la Berra
(grès et marnes du Flysch de la nappe du Gurnigel)

Captage

Le captage de la « Gormande à Léon » est raccordé au réseau d'eau potable de la commune de La Roche. Il s'agit d'un ouvrage en parfait état datant de 1995 (ABA GEOL 1996) implanté dans une zone où le flysch est fortement fracturé et décomprimé (figure 40). Une accumulation d'éboulis à quelques dizaines de mètres en

aval du captage et la présence d'un grand glissement à une centaine de mètres en contrebas attestent de l'instabilité des masses rocheuses.

Contexte géologique

Dans la région de la Berra, le Flysch du Gurnigel est constitué d'une alternance de bancs de grès et de marnes d'épaisseur décimétrique à métrique dont le pendage général est d'environ 50° vers le sud à sud-ouest.

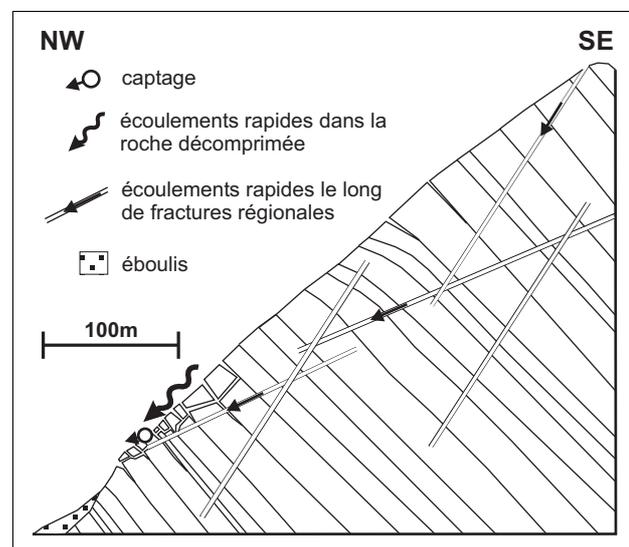


Figure 40: Coupe schématique montrant la situation du captage de la Gormande à Léon.

Données existantes et vulnérabilité du captage

Des variations significatives des débits, températures et conductivités sont observées selon les conditions hydrologiques, et la qualité bactériologique de l'eau captée est périodiquement dégradée, ce qui démontre la vulnérabilité du captage (ABA GEOL 1996). Un essai de traçage réalisé à plus de 500 mètres du captage (ABA GEOL 1996) dans les environs de la ligne de crête a révélé la présence d'écoulements rapides le long des réseaux de fractures (vitesses comprises entre 75 et 150 m/j).

Une accumulation anormale de particules fines, de terre et d'aiguilles de conifères a été observée dans le captage à la suite de crues en automne 2000. L'infiltration des précipitations à faible distance du captage est certainement à l'origine de ces apports d'eau de mauvaise qualité. Comme de tels problèmes n'avaient pas été rencontrés lors des années précédentes, on peut supposer qu'une modification de l'organisation des écoulements associée à la création de nouveaux passages préférentiels en direction des drains soit responsable de la dégradation de la qualité de l'eau. La forte influence de l'ouragan Lothar dans cette région en décembre 1999, qui a provoqué de nombreux déracinements et des mouvements dans les roches dans les premiers mètres à partir de la surface pourrait être responsable de ces modifications (F. Pasquier, comm. orale).

Degré d'hétérogénéité de l'aquifère

Le captage est alimenté d'une part par des eaux circulant dans la zone décomprimée et d'autre part par des systèmes d'écoulements fissuraux plus profonds dans le flysch. Les vitesses élevées déterminées par traçage (ABA GEOL 1996) impliquent que l'isochrone des 10 jours passerait au-delà de la limite du bassin d'alimentation du captage. Il s'agit donc d'un captage vulnérable situé dans un milieu fortement hétérogène (cas b2 de la figure 7). Seule une cartographie de la vulnérabilité doit permettre de délimiter les zones S en tenant compte de la forte hétérogénéité du milieu.

Application de la méthode « DISCO » pour la délimitation des zones de protection

Cartographie de la vulnérabilité

En raison du manque d'affleurements et de l'absence de développement d'une géomorphologie caractéristique au droit des structures drainantes, la cartographie du paramètre « discontinuités » ne permet pas ici de différencier clairement les zones plus ou moins perméables. Seul un nombre limité d'accidents d'extension hectométrique peut être cartographié sur la base de critères géologiques (Weidmann 2002) et géomorphologiques.

La zone décomprimée en amont du captage doit être considérée comme étant en liaison très rapide avec celui-ci (D_0), de même que quelques dépressions assimilables à des dolines, situées à proximité de la ligne de crête. La prudence conduit à considérer le reste du bassin d'alimentation comme fracturé et potentiellement en liaison rapide avec le captage (D_1).

La couverture protectrice est constituée d'un sol argilo-limoneux peu perméable dont l'effet protecteur est cependant limité (P_0 à P_2) en raison d'une épaisseur comprise entre 0 et 100 cm.

Zones de protection

Une zone S1 relativement vaste, de 20 mètres au minimum en amont des drains de la Gormande à Léon devrait être définie en raison d'écoulements rapides à faible profondeur dans la roche décomprimée. La zone S2 couvre le reste de bassin d'alimentation et comprend des forêts et des pâturages. Des précautions doivent être prises de manière à réduire les risques de pollutions ponctuelles sur le bassin d'alimentation (restaurant d'alpage, étables, véhicules de piste en hiver).

Comparaison avec les zones de protection existantes

En raison du manque d'information concernant la répartition des discontinuités, la quasi-totalité du bassin d'alimentation apparaît en zone S2, ce qui est en accord avec les zones de protection existantes (ABA GEOL 1996). Il s'agit donc d'un cas où la méthode « DISCO » ne permet pas de mettre en évidence des contrastes significatifs de vulnérabilité à l'échelle du bassin d'alimentation. Dans une telle situation l'application de la méthode « DISCO » doit toutefois être entreprise pour parvenir aux conclusions mentionnées. Il est tout de même possible de mettre en évidence des zones plus ou moins vulnérables (facteurs de protection compris entre 2 et 4), essentiellement sur la base de la cartographie des sols. Cette carte des facteurs de protection est utile dans le cadre de la planification de l'occupation du sol et peut permettre de minimiser les risques de pollutions du captage liés à l'élevage et au tourisme.

Exemple 2: Borgnone (TI)

(gneiss et roches basiques et ultra-basiques de la zone pennique d'Orsellina)

Captage

Le captage considéré est situé une vingtaine de mètres en amont de la route reliant les villages de Borgnone à Lionza sur le versant sud des Centovalli. L'ouvrage captant est ensablé et désaffecté depuis plusieurs années. Il est situé dans la partie amont d'une masse glissée constituée d'un mélange de blocs et de matériel fin.

Contexte géologique

Les roches sont principalement affectées d'une schistosité d'orientation WSW-ENE, parallèle à la structure tectonique régionale la plus importante (faille des Centovalli) et de deux systèmes de failles d'orientation NW-SE et N-S. L'effet d'une fracturation intense et de pentes escarpées se traduit par une forte instabilité des versants.

Données existantes et vulnérabilité du captage

Un suivi mensuel des débits, températures et conductivités des sources de la région a été réalisé en 1981-82 (Ammann 1983) puis 1992-93 (IGC 1993) dans le cadre d'un projet de tunnel visant à améliorer la sécurité de la route menacée par des instabilités rocheuses. Les fluctuations marquées de ces trois paramètres et la faible minéralisation des eaux (proche de celle des eaux de pluie) démontre la vulnérabilité du captage et la faible profondeur des écoulements. En considérant un débit moyen de 30 l/min, le bassin d'alimentation s'étend vraisemblablement jusqu'à 100 à 200 mètres en amont de la zone de résurgence (voir annexe 1). La plus grande partie du bassin est située en amont de la masse glissée. Les roches y sont subaffleurantes, mais il est difficile de déterminer si elles sont réellement en place ou s'il s'agit de masses tassées.

Degré d'hétérogénéité de l'aquifère

Dans le cadre de l'élaboration du présent guide pratique, une injection simultanée de 500 grammes d'uranine et de 500 grammes de sulforhodamine de part et d'autre d'un talweg dans l'axe duquel est situé

le captage a été effectuée. Seule l'uranine a été détectée. Bien que la restitution de la sulforhodamine puisse être relativement mauvaise dû à l'adsorption en présence de particules fines (présence de dépôts de pente limoneux associés à la roche décomprimée), ce résultat tend à montrer la forte hétérogénéité du milieu. Les vitesses sont de l'ordre de 14 mètres par jour. De très fortes précipitations (80 mm en deux jours) ont manifestement conditionné l'apparition du traceur (figure 41) et des vitesses plus élevées sont donc probables en cas d'injection lors de crues.

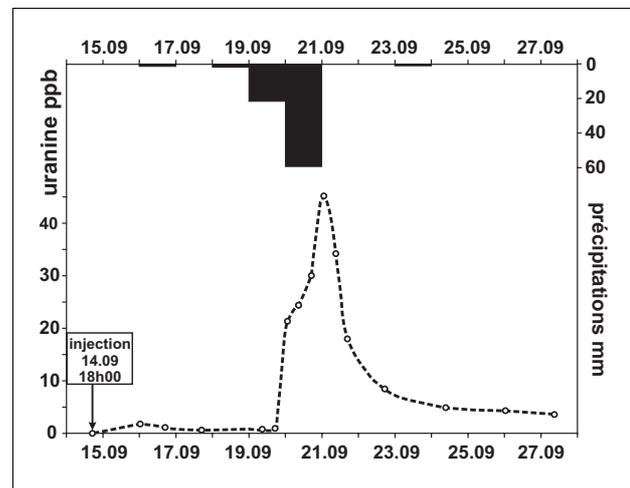


Figure 41: Essai de traçage réalisé dans le cadre de cette étude pour la source de Borgnone en septembre 2000. Injection à 90 mètres du captage, rinçage avec 3 à 5 m³ d'eau.

Délimitation des zones de protection

L'essai multitraçage a montré l'existence d'écoulements relativement rapides et la forte hétérogénéité du milieu. Il n'est cependant pas possible de caractériser l'hétérogénéité du milieu fissuré, et les caractéristiques de la couverture protectrice sont également difficiles à évaluer (mélange hétérogène de blocs et de dépôts de pente d'épaisseur et granulométrie variables). En regard de la faible extension du bassin d'alimentation et de vitesses d'écoulement de l'ordre de 20 m/j, l'assimilation de l'aquifère à un milieu continu est acceptable (cas b1 de la figure 7) et implique la délimitation d'une zone S2 couvrant l'ensemble du bassin d'alimentation au-delà de la zone S1.

Remarques

La présentation de ces deux exemples montre la difficulté d'exploiter et de protéger l'eau potable dans les zones instables et fortement décomprimées. Ceci d'une part en raison de circulations localement rapides et imprévisibles et d'autre part en raison des risques de dégradation à plus ou moins long terme des ouvrages captants. Dans de tels cas, il est recommandé de viser la sécurité en attribuant la zone S2 de manière assez globale au bassin d'alimentation.

6.5.2 Aquifères mixtes (porosité de fissure et d'interstice)

a) Double porosité

Certaines roches cohérentes, notamment les grès, présentent, en plus des discontinuités, une porosité d'interstice primaire significative. Cette porosité varie selon le type lithologique (granulométrie, compaction, métamorphisme). En Suisse, ce sont essentiellement les couches de la Molasse marine supérieure qui présentent des porosités d'interstice primaires importantes (figure 42).

D'autre part, on observe souvent dans la molasse et le flysch le développement d'une porosité d'interstice secondaire dans les premiers mètres à partir de la surface. Cette couche fonctionne alors comme un aquifère poreux et peut être drainée par les fissures en profondeur (figure 43). Ce cas est traité plus bas, sous b).

Exemple 3: Matran (FR)

Forage profond dans les grès de la Molasse marine supérieure (figure 42)

Captage

La commune de Matran s'alimente en eau potable par l'intermédiaire de quatre puits d'une profondeur voisine de 100 mètres forés dans les grès du « Burdigalien ».

Données existantes (d'après Thierrin 1990)

Bien que la perméabilité des grès soit faible (entre 10^{-6} et 10^{-7} m/s), des débits compris entre 50 et 200 l/min sont exploités par puits. La roche est très peu fracturée

et les écoulements ont donc essentiellement lieu dans les grès poreux. Les joints de stratification constituent cependant des zones potentiellement plus perméables et semblent jouer le rôle de drain. Les venues d'eau apparaissent dès une profondeur d'environ 30 mètres et sont artésiennes. Des analyses de tritium démontrent que ces eaux se sont infiltrées avant 1950.

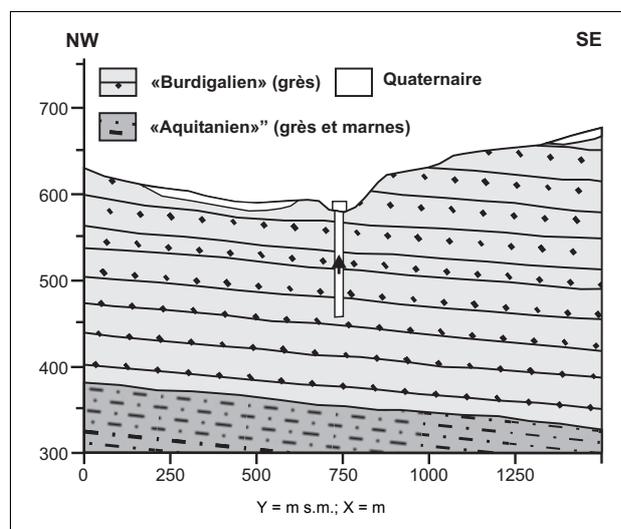


Figure 42: Coupe géologique schématique dans les environs d'un forage de Matran dans la Molasse marine supérieure, « Burdigalien » (d'après Thierrin 1990).

Conclusions, délimitation des zones de protection

La très faible vulnérabilité du captage est attestée par le temps de résidence élevé des eaux souterraines (cas a de la figure 7). Cette situation est liée à la présence de grès à porosité d'interstice, peu fracturés. En raison de leur faible perméabilité, ces grès sont le siège de circulations lentes et de phénomènes de filtration efficaces. D'autre part, le forage capte à relativement grande profondeur des eaux artésiennes vraisemblablement liées à des systèmes d'écoulement régionaux. Dans un tel cas, seule la délimitation d'une zone S1 est indispensable, de manière à prévenir d'éventuelles infiltrations d'eau de mauvaise qualité le long du tubage. Cependant des restrictions doivent être faites dans le bassin d'alimentation pour des ouvrages profonds comme les forages pour pompes à chaleur ou pour des activités pouvant contaminer l'aquifère à long terme (entreposage de déchets).

Un suivi des paramètres physico-chimiques en période de très fortes précipitations reste cependant indispensable pour garantir qu'aucune infiltration liée à des aquifères superficiels ne contribue à l'alimentation du captage. Une surveillance à long terme est également nécessaire pour s'assurer qu'aucune modification défavorable de l'organisation des écoulements n'intervienne au fur et à mesure de l'exploitation du captage.

b) Alimentation d'un milieu fissuré par l'intermédiaire d'un aquifère poreux perché

Cette situation est fréquente dans les milieux fissurés en Suisse. Les aquifères poreux sont représentés soit par des dépôts quaternaires (chenaux fluvio-glaciaires, moraine localement perméable) soit par une zone d'altération superficielle dans le cas de roches sédimentaires détritiques (décalcification, oxydation).

Exemple 4: Luterbach (BE)

Sources et galeries dans les grès, conglomérats et marnes de la Molasse marine supérieure (figure 43)

Le site de Luterbach a fait l'objet d'études détaillées dans le cadre d'un projet de recherche international sur les traceurs (Hötzl & Kleiber 1987, Schotterer & Müller 1987, Wernli 1987).

Captages et sources

Deux galeries creusées dans la molasse au pied d'une forte pente permettent de capter l'eau des fissures de la roche. Ces galeries contribuent à l'alimentation en eau potable de la commune de Burgdorf. De nombreuses sources non captées apparaissent également dans la région le long des flancs des collines.

Données existantes

Le fonctionnement complexe du site de Luterbach a été mis en évidence par des mesures géophysiques, par l'injection de traceurs et par des analyses des caractéristiques physico-chimiques et isotopiques de l'eau des sources et des galeries (Hötzl & Kleiber 1987, Schotterer & Müller 1987, Wernli 1987). L'ensemble des observations a montré que les vitesses d'écoulement des eaux souterraines sont relativement lentes (2 à 5 m/j), ce qui est en accord avec les faibles

taux de renouvellement (plusieurs années) déterminés à l'aide des isotopes. Les diverses sources ont toutefois des caractéristiques physico-chimiques distinctes, ce qui révèle la présence d'eaux d'origines différentes.

Conclusions, délimitation des zones de protection

L'exemple du site de Luterbach permet d'illustrer les différents types d'écoulement rencontrés dans la Molasse du Plateau (voir figure 43, types d'écoulement 1 à 5).

L'intérêt d'un suivi séparé des différentes venues d'eau d'un captage en galerie est évident lors de l'évaluation de la vulnérabilité du captage, en raison des différentes origines possibles de l'eau. La contribution d'une petite venue d'eau de mauvaise qualité pourrait passer inaperçue si les mesures sont effectuées de manière globale.

Dans le cas de Luterbach, les vitesses de transit clairement inférieures à dix mètres par jour ont été observées en direction de la galerie, ce qui est parfaitement en accord avec le comportement stable du captage. Si les venues d'eau possèdent des caractéristiques physico-chimiques contrastées et montrent la contribution d'apports d'origines différentes, la stabilité des débits et des paramètres physico-chimiques (Wernli 1987) témoigne par contre de la faible vulnérabilité des galeries en général.

Concernant la délimitation des zones de protection, il apparaît que les aquifères situés dans la Molasse du Plateau peuvent le plus souvent être assimilés à des milieux continus en raison de la forte influence de réservoirs à porosité d'interstice et d'une porosité de fracture relativement faible. Lorsque que le rôle des fractures est uniquement de drainer localement l'eau des aquifères poreux sus-jacents, la délimitation des zones de protection est effectuée selon les principes recommandés pour les aquifères poreux (annexe 4 de OEaux 1998).

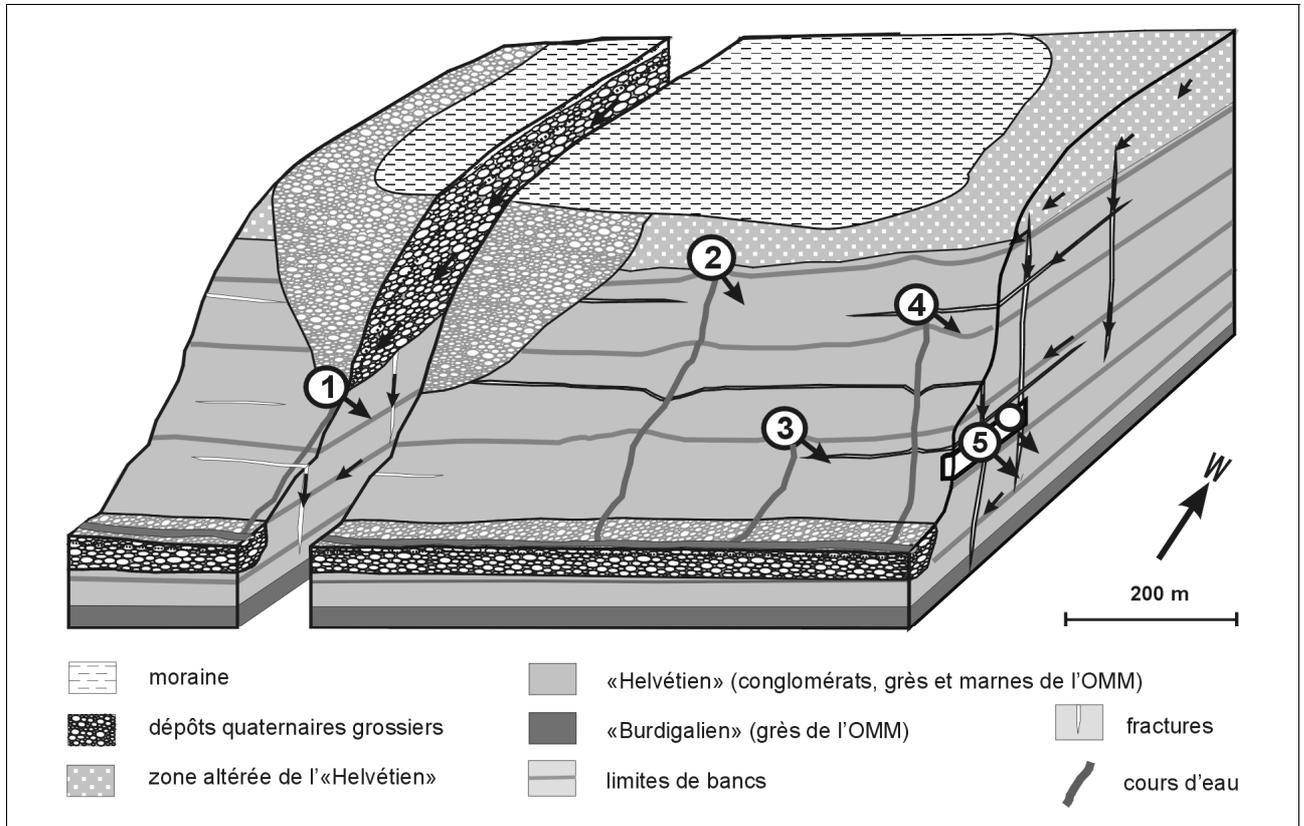


Figure 43: Bloc diagramme schématisant les différents types d'écoulement rencontrés à Luterbach.

- 1) source liée à un chenal quaternaire,
 - 2) source liée à la couche superficielle altérée et décalcifiée de la molasse,
 - 3) source apparaissant au niveau d'un banc plus marneux,
 - 4) source liée à une fracture dans la molasse non altérée mais alimentée essentiellement par l'eau stockée dans la zone altérée,
 - 5) captage en galerie avec venues d'eau au niveau de fractures subverticales liées à la décompression post-glaciaire; ces fractures sont également en connexion avec des réservoirs à porosité d'interstice.
- OMM = Molasse marine supérieure.

Remarques

En présence de captages vulnérables situés dans le contexte du Plateau suisse, l'utilisation de la géophysique doit être envisagée, car les affleurements et les indices géomorphologiques sont très rares et ne permettent pas de déterminer la structure de l'aquifère.

c) Exutoire en milieu poreux

Etant donné l'omniprésence des dépôts quaternaires dans les régions alpines et du Plateau suisse, on note souvent l'existence de formations non consolidées d'épaisseur significative et caractérisées par une bonne perméabilité (moraine latérale, fluvio-glaciaire,

éboulis) dans la zone d'exutoire des aquifères fissurés (figure 44). L'eau captée est alors un mélange d'eau provenant de l'aquifère fissuré et de l'aquifère quaternaire.

Dans le cas de captages vulnérables, une estimation des vitesses de transit dans les deux aquifères doit être effectuée pour comprendre l'organisation des écoulements et déterminer l'origine des apports d'eau de mauvaise qualité. Lors d'essais de traçage, l'injection de traceur dans le milieu fissuré (système d'écoulement « régional ») et dans le milieu poreux (système d'écoulement « local ») est recommandée.

Conclusions, délimitation des zones de protection

Si les propriétés de l'aquifère poreux et de l'aquifère fissuré sont clairement différentes (hétérogénéité, vitesse de transit) les zones de protection doivent être définies selon des critères différents pour les deux aquifères:

- méthode des isochrones pour le milieu non consolidé (OEaux 1998)
- application de la démarche méthodologique présentée dans le cadre de ce guide (figure 7) pour le milieu fissuré.

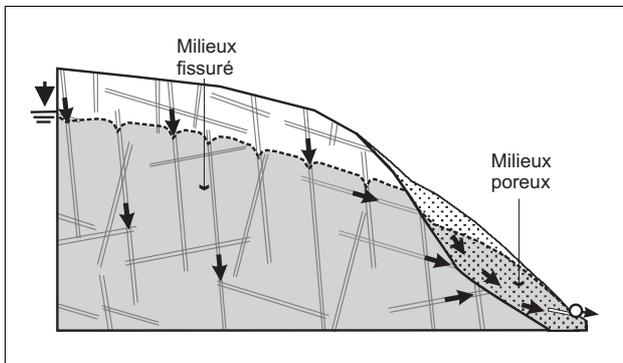


Figure 44: Coupe schématique d'un aquifère fissuré avec zone d'exutoire en milieu poreux.

6.5.3 Infiltration de cours d'eau à proximité d'un captage

Dans le cas de captages situés à faible distance d'un cours d'eau, une contribution significative des eaux de surface au débit capté est fréquemment observée. Les vitesses de transit en direction du captage sont souvent rapides en raison de la mise en charge des fractures situées le long du cours d'eau (figure 45).

Ce type de situation est souvent rencontré dans les régions de montagne. Les zones de résurgence apparaissant au point topographiquement bas, de nombreux captages sont implantés sur les flancs de vallées transversales, à proximité de cours d'eau.

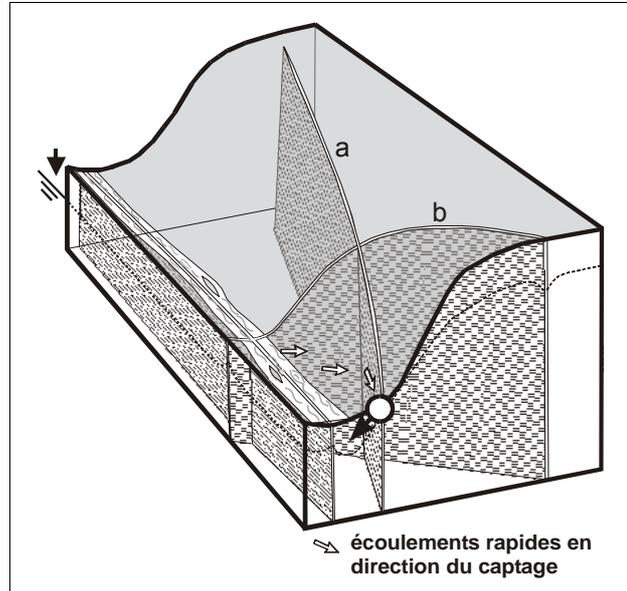


Figure 45: Esquisse d'une source située à faible distance d'un cours d'eau. L'eau s'infiltré en amont du captage le long du cours d'eau et peut s'écouler rapidement par l'intermédiaire des fractures interconnectées a et b.

Ces relations entre eaux de surface et eaux souterraines peuvent être mises en évidence par essai de traçage. L'injection d'un traceur en continu dans le cours d'eau pendant plusieurs heures et un échantillonnage serré pendant quelques jours est alors particulièrement utile. Il permet de déterminer le temps de transit entre la zone de pertes et le captage et d'estimer le pourcentage de contribution du cours d'eau au débit capté.

Conclusions et recommandation

Dans de telles situations, la qualité de l'eau captée sera fortement influencée par celle du cours d'eau. Dans ce cas, il est recommandé d'examiner la possibilité de limiter cette influence, p.ex. par l'étanchéification du cours d'eau. Si cela ne peut pas être réalisé, des mesures veillant à garantir la bonne qualité des eaux de surface devront impérativement être proposées (par ex. délimitation d'une aire A_0) et une installation de traitement devra être prévue.

7 Recommandations, aspects financiers

7.1 Recommandations

Acquisition des données complémentaires en présence d'un nombre élevé de captages

Une des caractéristiques des aquifères fissurés en Suisse est la présence d'un très grand nombre de captages caractérisés par de faibles débits (débits moyens le plus souvent compris entre 30 et 500 l/min). Dans de nombreux cas, les communes s'alimentent en eau potable par l'intermédiaire de plusieurs captages, ce qui multiplie le nombre de données à collecter. S'il est particulièrement important d'obtenir un nombre suffisant de données pour chaque captage dans le cadre de l'étude de base, les captages présentant des caractéristiques similaires peuvent ensuite être regroupés pour que les coûts de l'étude restent raisonnables. Les essais de traçage ou les observations détaillées d'événements de crue peuvent ainsi être effectués sur un nombre réduit de captages représentatifs.

Application de la méthode de cartographie « DISCO »

Lors de l'application de la méthode « DISCO », la détermination des facteurs de protection sur la base des cartes des paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice » et des phénomènes de ruissellement représente une partie importante du travail. Dans le cas d'un bassin d'alimentation de grande extension (supérieure à 1 km²) et lorsque les cartes des paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice » sont complexes (grand nombre de polygones caractérisés par des indices différents), l'utilisation d'un système d'information géographique est fortement recommandée. Pour des bassins d'alimentation d'une taille inférieure à 1 km² et/ou lorsque les cartes des paramètres ne sont pas trop complexes, l'utilisation d'un programme de dessin sur ordinateur, voire un traitement manuel des données peuvent s'avérer suffisants.

Par souci de transparence, il est recommandé de faire figurer dans le rapport d'expert les différentes cartes ayant permis la définition des zones de protection (cartes des paramètres « discontinuités » et « couverture protectrice », cartes du « facteur de protection intermédiaire » et du « facteur de protection final »).

7.2 Aspects financiers

Le temps à investir dans le cadre d'une étude pour la délimitation des zones de protection est non seulement dépendant des caractéristiques du captage et du contexte hydrogéologique mais également des données géologiques et hydrogéologiques existantes ainsi que de l'étendue, la complexité et l'accessibilité du site considéré et de la diversité de l'utilisation du territoire. Le calcul des heures de travail nécessaires pour l'application de la démarche méthodologique (tableau 6) est indicatif. Il est présenté sous forme de fourchettes afin de tenir compte de ces différents facteurs. Dans les cas complexes ou si la documentation existante est insuffisante, cette fourchette peut être dépassée.

Tableau 6: Estimation du nombre d'heures nécessaires pour la délimitation des zones de protection selon les trois méthodes présentées (déplacements et frais non inclus); voir commentaires dans le texte, chapitre 7.2.

Etude de base

Compilation de la documentation existante (géologie et hydrogéologie, plans communaux)	4 à 8 heures
Reconnaissance des captages et du bassin d'alimentation potentiel, première tournée de mesure	4 à 8 heures
10 tournées de mesure aux captages	15 à 50 heures
Interprétation des données, rapport succinct	8 à 16 heures
Séances, divers	4 heures
Total (arrondi)	35 à 85 heures

Principaux frais: analyses chimiques et bactériologiques, déplacements

Etude complémentaire

Etude détaillée du bassin d'alimentation (discontinuités, zones d'infiltration)	4 à 8 heures
Essai multitraçage (organisation, injection, interprétation)	12 à 24 heures
Suivi d'événements de crue	8 à 12 heures
Interprétation des données, rapport succinct	8 à 16 heures
Total (arrondi)	30 à 60 heures

Principaux frais: essai multitraçage (déplacements, traceurs, échantillonnage, analyses); le cas échéant, location d'appareils de mesure, géophysique

Délimitation des zones de protection

Cas a

Rédaction du rapport final, cartes, règlement	8 à 12 heures
Séances, divers	4 heures
Total (arrondi)	15 heures

Total des heures pour le cas a (étude de base + délimitation de zones S): 50 à 100 heures

Cas b1

Rédaction du rapport final, cartes, règlement	12 à 16 heures
Séances, divers	4 heures
Total (arrondi)	15 à 20 heures

Total des heures pour le cas b1 (étude de base + étude complémentaire + délimitation des zones S): 80 à 165 heures

Cas b2

Cartographie des paramètres discontinuités, couverture protectrice, évaluation des phénomènes de ruissellement	8 à 16 heures pour 1 km ²
Interprétation, réalisation des cartes, détermination du facteur de protection	12 heures
Contrôles de terrain, ajustements	4 à 6 heures
Rédaction du rapport final, règlement	16 heures
Séances, discussions internes, divers	8 heures
Total (arrondi)	50 à 60 heures

Total des heures pour le cas b2 (étude de base + étude complémentaire + délimitation des zones S):
115 à 205 heures (+ 6 à 10 heures par km² supplémentaire)

8 Conclusions et perspectives

La démarche méthodologique proposée dans le cadre de ce guide pratique permet de délimiter les zones de protection des captages en milieu fissuré en tenant compte des différents types de contextes hydrogéologiques rencontrés en Suisse. Elle permet une définition des zones de protection basée sur des critères hydrogéologiques rigoureux en utilisant à bon escient les outils à disposition de l'hydrogéologue.

La réalisation d'une étude relativement simple pour les captages naturellement bien protégés contre les pollutions et d'une étude plus poussée pour les captages vulnérables permet en outre de limiter les coûts dans les cas les moins problématiques. L'approche proposée a été développée de manière à exiger l'acquisition du minimum de données nécessaire pour permettre une délimitation appropriée des zones de protection.

Dans le cas des captages peu vulnérables, l'étude de base doit être effectuée avec un soin particulier, puisque c'est uniquement sur la base d'une excellente stabilité du captage (même en cas de fortes précipitations) et d'une qualité de l'eau irréprochable que la méthode simplifiée de dimensionnement minimum doit être appliquée.

Pour les captages vulnérables dans le cas d'aquifères faiblement hétérogènes, la délimitation des zones de protection est effectuée en considérant l'aquifère fissuré comme un milieu continu équivalent. En raison de l'hétérogénéité du milieu à l'échelle locale, la détermination des vitesses d'écoulement les plus élevées, qui doivent servir de base à la définition de l'isochrone des 10 jours, peut s'avérer délicate. La réalisation d'essais de traçage dans des conditions optimales (période de hautes eaux, injection de traceurs en plusieurs points dans des zones fortement fracturées) doit toutefois permettre de définir des zones S d'extension suffisante pour garantir une protection efficace du captage.

Pour les captages vulnérables dans le cas d'aquifères fissurés fortement hétérogènes, la délimitation des zones de protection selon une méthode de cartographie multicritère de la vulnérabilité est nécessaire. Son application requiert un volume de travail important et ne peut se départir d'une certaine incertitude liée à la qualité des données collectées sur le bassin d'alimentation. C'est cependant l'unique approche qui permette de concilier une activité générant des contraintes importantes sur le bassin d'alimentation (élevage, tourisme) et l'exploitation d'une eau potable de qualité acceptable. Si la prévention a un prix, elle est aussi un investissement avantageux. Elle doit permettre d'améliorer de manière durable la qualité de l'eau captée en permettant de planifier de manière adéquate l'occupation du sol (épandage de fumure, utilisation d'engrais ou de pesticides) sur l'ensemble du bassin d'alimentation du captage. D'autre part, elle doit également permettre de réduire au maximum les problèmes de pollutions ponctuelles accidentelles (ex.: fuite de fumure ou de carburant) ou permanentes (ex.: trop grandes concentrations de bétail autour des abreuvoirs ou des endroits de traite) dans les zones les plus vulnérables (S1 et S2).

9 Références bibliographiques

- ABA GEOL 1996: Etude hydrogéologique pour la délimitation des captages communaux du massif de la Berra à la Roche. Rapport non publié, Fribourg.
- AMMAN, P. 1983: Le sorgenti comunali, idrogeologia e zone di protezione. Rapport non publié, Losone.
- AVIAS, J.V. 1982: Sur la méthodologie d'étude de la décompression superficielle morphologique et tectonique des milieux fissurés. Application à la recherche et à l'exploitation des aquifères de ces milieux. Document BRGM, Colloque National, Orléans-La Source en hommage à G. Castany, mars 1982. Les milieux discontinus en hydrogéologie, comm. N° 45, 47–51.
- BASABE-RODRIGUEZ, P.P. 1993: Typologie des eaux souterraines du Flysch de la nappe tectonique du Niesen (Préalpes Suisses). Thèse EPFL, Lausanne, 200 p.
- BRUTTIN, A.-M. 1994: Etude hydrogéologique pour la délimitation des zones de protection des sources. Rive droite. Services industriels de Bagnes. Rapport non publié.
- CRUCHET, M. 1985: Influence de la décompression sur le comportement hydrogéologique des massifs cristallins en Basse Maurienne (Savoie, France). Géol. Alpine 61, 65–73.
- CSD 1985: Wasserversorgungs-Genossenschaft Weissenberg-Obersteg-Bleiken. Quellen Weissenberg. Hydrogeologischer Bericht, Vorschlag Schutzzonenausscheidung. Rapport non publié.
- DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHIEDER, N., NEALE, S., POPESCU, C. & ZWAHLEN, F. 2002: Main concepts of the « European Approach » for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Journal 10, 340–345.
- DOERFLIGER, N. & ZWAHLEN, F. 1998: Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). Guide pratique. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, 56 p.
- DUBOIS, J.D. 1991: Typologie des aquifères cristallins: exemple des massifs des Aiguilles Rouges et du Mt-Blanc. Thèse EPFL, Lausanne, 324 p.
- FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. 1991: Karst geomorphology and hydrology. Chapman & Hall, London, 601 p.
- FURRER, H., HUBER, K., ADRIAN, H., BAUD, A., FLÜCK, C., PREISWERK, P., SCHULER, P. & ZWAHLEN, P. 1993: Feuille 1247 Adalboden. – Atlas géol. Suisse 1: 25'000, Carte 87, avec notice explicative. SHGN (Service hydrologique et géologique national), Berne.
- GRUBENMANN, H.U. 1994: Schutzzonenausscheidung im Berggebiet. Ergänzende Untersuchungen. Ergebnisse 1991–1993. Rapport non publié, Geotechnisches Büro, Gommiswald.
- HABICHT, K. 1945: Geologische Untersuchungen im südlichen sanktgallischen-appenzellischen Molassegebiet. Beitr. geol. Karte Schweiz N. F. 83.
- HACHICHA, M., BOUKSILA, F., ZAYANI, K. & MHIRI, A. 1996: Etude comparative de la perméabilité mesurée par les méthodes de Reynolds, Porchet et Müntz dans le cas de sols argileux affectés par la salinité. Note méthodologique. Cahiers sécheresse vol 7/3, 209–215.
- HÖTZL, H. & KLAIBER, D. 1987: Hydrogeologic introduction into the Molasse Sandstone testsite, Switzerland. – Proceedings of the International Symposium on Underground Water Tracing, 1986, Athens – Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, 391–401.
- IGC 1993: Progetto A560, strada delle Centovalli, porte e caratteristiche fisico-chimiche delle acque per l'anno idrologico 1992–1993. Istituto geologico cantonale, Dipartimento del territorio, rapport non publié, Cadenazzo.
- JAMIER, D. 1975: Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes des massifs de l'Arpille et du Mt-Blanc. Thèse, Université de Neuchâtel, 153 p.
- KELLER, B. 1992: Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissenstand und weiterführende Betrachtungen. Eclogae geol. Helv. 85/3, 611–651.
- KIRCHHOFER, W. & SEVRUK, B. 1992: Hauteurs annuelles moyennes corrigées des précipitations 1951–1980. Atlas hydrologique de la Suisse,

- planche 2.2. SHGN (Service hydrologique et géologique national), Berne.
- LALLEMAND-BARRÈS, A. & ROUX, J.-C. 1999: Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Manuel & méthode. BRGM, Orléans, 334 p.
- MAILLET, E. 1905: Essai d'hydraulique souterraine et fluviale. Hermann, Paris.
- MARÉCHAL, J.-C. 1998: Les circulations d'eau dans les massifs cristallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains. Thèse EPFL, Lausanne, 297 p.
- McRAE, S.G. 1988: Practical pedology – studying soils in the fields. Ellis Horwood Limited, Chichester, 253 p.
- MENZEL, L., LANG, H. & ROHMANN, M. 1999: Evaporation réelle annuelle moyenne 1973–1992. Atlas hydrologique de la Suisse, planche 4.1. SHGN (Service hydrologique et géologique national), Berne.
- MÉTÉOSUISSE 1999: Bulletin des précipitations. – MétéoSuisse.
- MÉTÉOSUISSE 2000: Bulletin des précipitations. – MétéoSuisse.
- OFEFP 2004: Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne.
- REHSE, W. 1977: Elimination und Abbau von organischen Fremdstoffen, pathogenen Keimen und Viren in Lockergestein. Zeit. Deut. Geol. Ges. 128, 319–329, Hannover.
- SAUTIER, J.-L. 1984: Guide du Service fédéral d'améliorations foncières. Office fédéral de l'agriculture, Berne.
- SCHAER, J.P. 1960: Géologie de la partie septentrionale de l'éventail de Bagnes. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, Extrait des « Archives des sciences, Genève », 474–620.
- SCHÄDLER, B. & WEINGARTNER, R. 2002: Eléments du bilan hydrique naturel 1961–1990. Atlas hydrologique de la Suisse, planche 6.3. Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne.
- SCHAUL, T. 1999: Délimitation des zones de protection en milieu fissuré. Exemple d'application dans la Molasse chevauchée (Rieden, SG). Travail de diplôme non publié. Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel.
- SCHNEIDER, H. 1988: Die Wassererschliessung. Ed. Vulkan, Essen, 876 p.
- SCHOTTERER, U. & MÜLLER, I. 1987: Investigation of groundwater flow systems in a quaternary-sandstone complexe near Berne (Switzerland), by means of indirect methods of environmental isotopes and geophysics. – Proceedings of the International Symposium on Underground Water Tracing, 1986, Athens – Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, 403–412.
- SCHUDEL, B., BIAGGI, D., DERVEY, T., KOZEL, R., MÜLLER, I., ROSS, J.H. & SCHINDLER, U. 2002: Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie – Guide pratique. Rapp. OFEG, Sér. Géol. 3, Berne.
- STECK, A., BIGIOGGERO, B., DAL PIAZ, G.V., ESCHER, A., MARTINOTTI, G. & MASSON, H. 1999: Carte tectonique des Alpes de Suisse occidentale, 1:100 000. Carte géologique spéciale N° 123. – Service hydrologique et géologique national, Berne.
- THIERRIN, J. 1990: Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse Occidentale). Thèse, Université Neuchâtel, 306 p.
- WEIDMANN M. 2002: Feuille 1205 Rossens. – Atlas géol. Suisse 1:25'000, Carte 105. Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne.
- WERNLI, H.R. 1987: Zur Anwendung von Tracer-methoden in einem quartärbedeckten Molassegebiet. – Proceedings of the International Symposium on Underground Water Tracing, 1986, Athens – Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, 413–421.

Bases légales (fédérales):

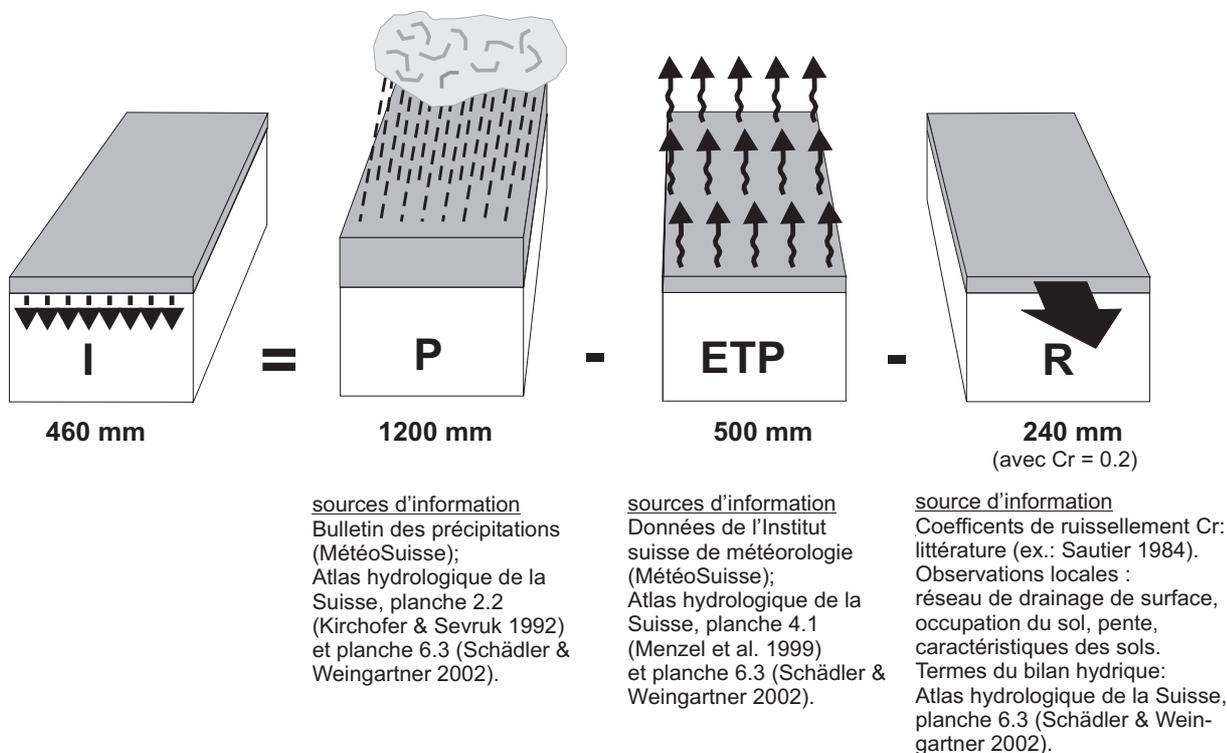
- Loi du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux, RS 814.20).
- Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux, RS 814.201).

Annexes

Annexe 1 Détermination de l'extension d'un bassin d'alimentation par calcul du bilan annuel

Le bilan se calcule en 3 étapes. Une 4ème étape sert à ajuster les limites du bassin d'alimentation. Les calculs sont indicatifs. Les résultats doivent être considérés respectivement comme des ordres de grandeur et comme des surfaces minimales.

1) détermination de la lame d'eau infiltrée **I** (infiltration efficace) sur la base de l'estimation de **P** (précipitations), **ETP** (évapotranspiration) et **R** (ruissellement) :



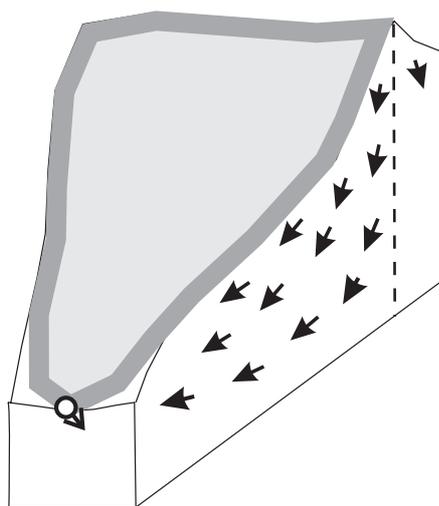
2) estimation du débit annuel du captage :

$$\text{Débit du captage : } Q_{\text{moy}} = 250 \text{ l/min} \rightarrow Q_{\text{annuel}} = 131400 \text{ m}^3/\text{an}$$

3) calcul de la surface approximative du bassin d'alimentation

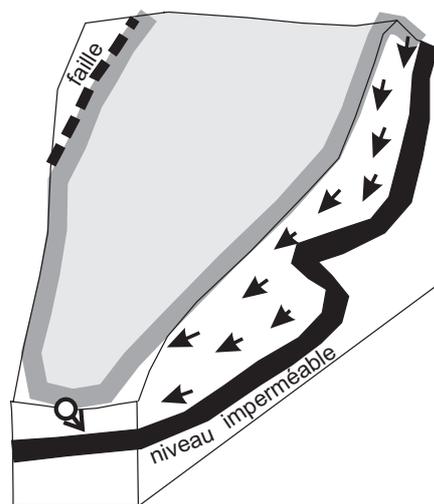
$$S = \frac{Q_{\text{annuel}}}{\text{lame d'eau infiltrée}} = \frac{131400}{0.46} = 285600 \text{ m}^2 = \boxed{0.3 \text{ km}^2}$$

4) Ajustement des limites du bassin en fonction des conditions topographiques et hydrogéologiques locales



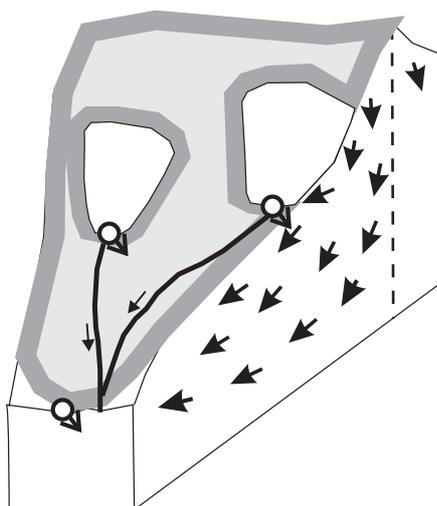
Topographie

Confrontation de la surface déterminée par le bilan annuel avec le bassin versant hydrologique de la source (ligne de crête, etc...).



Structure géologique

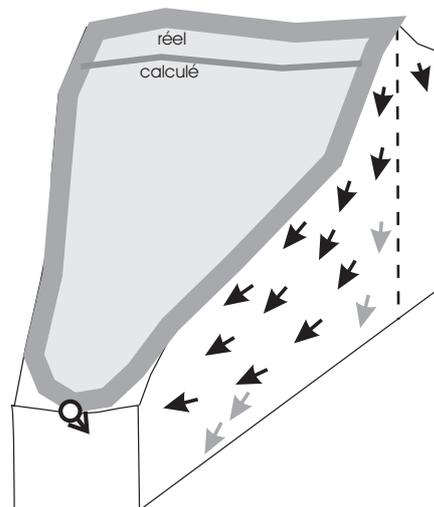
Prise en compte de la structure géologique, qui détermine l'extension du bassin hydrogéologique.



Présence d'autres résurgences

La prise en considération des résurgences situées à proximité du captage considéré doit permettre :

- de mieux fixer latéralement les limites du bassin en estimant grossièrement l'extension des bassins d'alimentation contigus,
- de tenir compte de la présence de sources d'origine peu profonde dont l'eau est exportée au delà du bassin d'alimentation.



Contribution à des systèmes d'écoulement plus profonds

Une partie de l'eau infiltrée sur le bassin d'alimentation de la source peut également contribuer à alimenter des systèmes d'écoulement plus profonds (phénomène impossible à quantifier). Cela implique une sous-estimation de la surface du bassin d'alimentation calculé par le bilan annuel.

Annexe 2 Caractérisation globale de la vulnérabilité du captage

A Débit, température et conductivité

Nombre d'observations minimal nécessaire

Le comportement hydrologique du captage doit être évalué sur la base d'un nombre suffisant de mesures de débit, conductivité et température (une dizaine au minimum).

Parmi ces mesures, au minimum deux doivent être prises peu après de fortes précipitations (15 à 20 mm au minimum). Une répartition des mesures sur une longue période (si possible sur une année hydrologique avec une mesure par mois) permet d'autre part d'estimer le débit moyen et de mettre en évidence les fluctuations saisonnières.

Mesures en cas de fortes précipitations

La réaction d'un captage est fortement dépendante des conditions antécédentes d'humidité. Après une longue période sèche, de fortes précipitations (>15 mm) pourront se traduire par une réaction très faible au niveau du captage en raison d'un déficit en eau important dans la zone non saturée, les sols et les végétaux. Une averse identique intervenant lors d'une période relativement humide pourra par contre fortement influencer les débits, températures et conductivités. Il est indispensable d'avoir à disposition des mesures lors d'une période de recharge significative de l'aquifère.

Représentativité des mesures

Un certain nombre de précautions doivent être prises pour garantir la qualité et la représentativité des mesures:

- le lieu de la mesure doit être précisé (captage, collecteur, réservoir) et les observations doivent être faites au même endroit pour être comparées. Des mesures propres à chaque source et le plus près possible de la zone de résurgence sont recommandées,
- la méthode de détermination du débit doit être mentionnée (seau, lecture déversoir), de même qu'une estimation de l'incertitude,

- lors de la mesure de la conductivité, les caractéristiques de l'appareil doivent être mentionnées (conductivité ramenée à 20 ou 25°C) et la valeur lue doit être stabilisée,
- une brève description des conditions météorologiques le jour même et les jours précédant les mesures est indispensable pour l'interprétation des données, en complément des données pluviométriques de MétéoSuisse (ex.: orage local, précipitations sous forme de neige, fonte des neiges),
- en cas d'exploitation de données anciennes, leur fiabilité doit être évaluée.

Présentation et interprétation des résultats

Les mesures de débit, température et conductivité devraient être représentées dans un graphe où figure également la pluviométrie, déterminée sur la base des stations météorologiques les plus proches (*voir p.ex. la figure 21*). Les variations des paramètres mesurés peuvent ensuite être interprétées en tenant compte des conditions météorologiques.

B Qualité de l'eau

Biologie

Un minimum de trois mesures de bactériologie est recommandé pour délimiter les zones de protection. Les échantillons doivent être prélevés dans des périodes où les risques sur le bassin d'alimentation sont élevés (présence de bétail, purinage, tourisme) et en tenant compte des conditions météorologiques (plus grande probabilité de pollution biologique après de fortes pluies).

Chimie

L'importance des analyses chimiques est fortement dépendante de l'occupation du sol. En présence d'agriculture intensive, plusieurs analyses concernant notamment les nitrates et les pesticides sont nécessaires. Dans les zones où l'activité agricole se limite à l'élevage, deux analyses chimiques comprenant les

ions majeurs, le nitrate, l'ammonium et la demande en oxygène peuvent être suffisantes.

Turbidité

Les mesures de turbidité ne sont pas obligatoirement effectuées en routine, mais elles permettent de mettre en évidence la présence de problèmes en cas de dépôts de particules fines dans le captage ou en cas de couleur anormale de l'eau en période de crue. Lorsque la présence d'une turbidité élevée est suspectée, des mesures spécifiques doivent être effectuées en période de crue.

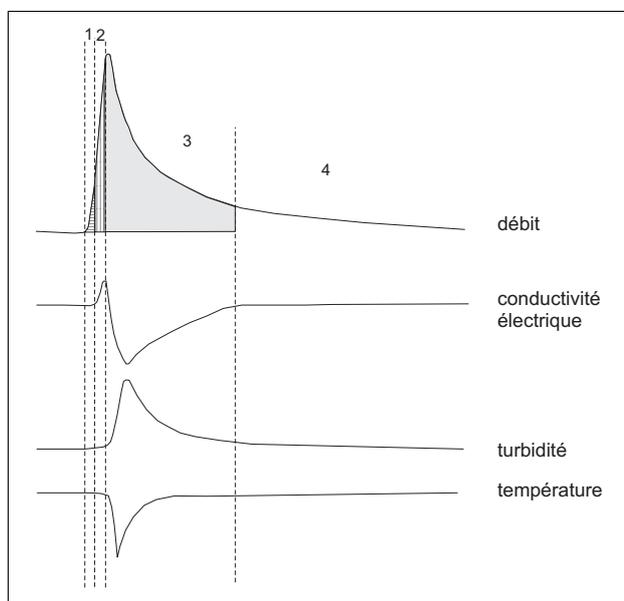
Annexe 3 Caractérisation des aquifères au moyen des hydrogrammes

A Interprétation des hydrogrammes

Le suivi des variations de débit, conductivité, température et turbidité lors d'une crue permet d'acquérir des informations sur les caractéristiques globales de l'aquifère et sa vulnérabilité.

Différentes méthodes ont été développées pour interpréter la réponse des aquifères karstiques et en déduire des informations sur leur structure et leur fonctionnement. Peu de travaux ont été effectués sur des hydrogrammes en milieu fissuré, mais certaines des méthodes mentionnées plus haut peuvent également permettre d'obtenir des informations sur ce type d'aquifère.

Décomposition d'un hydrogramme en diverses phases (modifié d'après Ford & Williams 1991)



Remarques: ce schéma est présenté à titre d'exemple. L'allure des différentes courbes change d'un aquifère ou d'une source à l'autre et selon les conditions hydrologiques. L'effet « piston » (phases 1 et 2) n'apparaît pas systématiquement. Les conditions antécédentes d'humidité, les caractéristiques des précipitations

(structure, quantité) influencent également l'allure des hydrogrammes.

Phases 1 et 2: effet piston. L'augmentation des débits n'est pas accompagnée d'une baisse de la conductivité, l'eau fraîchement infiltrée n'arrive pas encore à l'exutoire. La stabilité des températures, voire de la turbidité (augmentation possible due à un accroissement des vitesses dans l'aquifère) confirme cette hypothèse. L'eau ancienne stockée dans l'aquifère et dans la zone non saturée est poussée vers l'exutoire par l'augmentation des charges hydrauliques. Lors de la 1^{ère} phase, les caractéristiques de l'eau restent comparables à celles du débit de base précédant la crue. Lors de la 2^{ème} phase on observe une augmentation des conductivités liée à la mobilisation d'eau plus minéralisée, stockée dans des volumes peu perméables de la zone saturée ou non saturée.

Phase 3: les eaux fraîchement infiltrées rejoignent l'exutoire. Cela se traduit par un pic négatif de conductivité et souvent par une modification des températures (pic positif ou négatif selon les contrastes de température entre la pluie et l'aquifère) et un pic de turbidité. Les eaux infiltrées au droit de zones de forte perméabilité bien connectées au captage rejoignent rapidement l'exutoire (infiltration directe des précipitations et d'eaux de ruissellement).

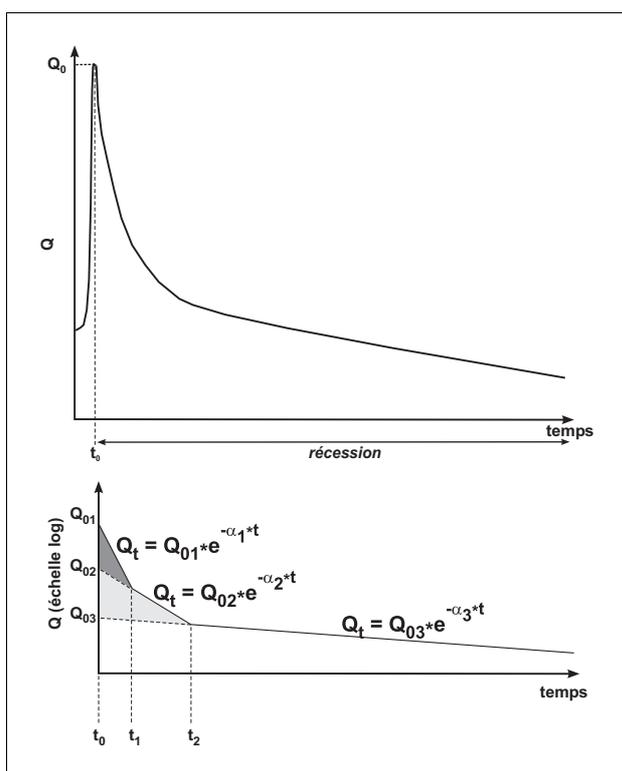
Phase 4: la proportion d'eau fraîchement infiltrée diminue progressivement. Les eaux infiltrées lors de la crue contribuent en plus faible proportion au débit et leurs caractéristiques chimiques et thermiques se différencient de moins en moins de celle des eaux plus anciennes en raison d'un contact prolongé avec l'aquifère. Sur la base des caractéristiques de l'eau et de l'allure de la courbe de décrue cette phase peut être assimilée au *débit de base*.

B Décomposition d'hydrogrammes

selon la méthode de Maillet (1905)

La représentation de la courbe de récession d'une source avec une échelle semi-logarithmique peut généralement être décomposée en plusieurs segments de droite. Dans ce cas, la courbe de récession correspond à la succession de plusieurs fonctions exponentielles. Chaque fonction exponentielle peut être assimilée à un réservoir se vidangeant plus ou moins rapidement et donc caractérisé par une plus ou moins forte perméabilité.

Exemple d'hydrogramme dont la courbe de récession peut être décomposée en trois fonctions exponentielles:



Les débits initiaux des réservoirs considérés au début de la récession Q_{0i} , les coefficients de tarissement α_i (pente des droites) et les temps t_i correspondant aux intersections de ces segments de droite, peuvent être déterminés et permettent de caractériser les différents réservoirs.

Si cette séparation en un nombre de réservoirs distincts à caractéristiques très différentes ne correspond qu'à un modèle très simplifié de la réalité, cette méthode permet néanmoins d'évaluer l'hétérogénéité des aquifères (plus les coefficients α sont différents plus l'aquifère peut être considéré comme hétérogène).

Les volumes écoulés lors de la crue, qui correspondent à la surface des triangles représentés sur la figure ci-dessous, peuvent également être calculés. En comparant ces volumes avec une estimation grossière du volume infiltré lors de la crue (= surface du bassin d'alimentation x précipitation efficace), un pourcentage d'apport rapide peut également être déterminé. Plus ce pourcentage sera élevé et plus le tarissement de ces réservoirs sera rapide, plus l'aquifère sera considéré comme vulnérable (une grande proportion des précipitations est évacuée rapidement vers l'exutoire par l'intermédiaire de zones de forte perméabilité).

Annexe 4 Recommandations concernant les essais de traçage en milieu fissuré

Lieu d'injection: Quel que soit le type de roche fissurée, l'hétérogénéité à l'échelle locale (mètre ou dizaine de mètres) rend le résultat de l'essai de traçage fortement dépendant du point d'injection. Certaines précautions facilitent l'injection du traceur:

- choix d'une zone potentiellement perméable sur la base de critères géomorphologiques, géologiques ou géophysiques,
- utilisation d'une fouille d'injection assez étendue pour optimiser les chances d'infiltration dans des fractures de bonne perméabilité,
- réalisation d'essais d'infiltration sur le lieu de l'injection pour s'assurer que la zone choisie est suffisamment perméable.

Utilisation de plusieurs traceurs: L'utilisation simultanée de deux ou trois traceurs différents permet d'augmenter les chances de réponse positive et d'acquérir une meilleure connaissance de l'organisation des écoulements.

Conditions hydrologiques: Les vitesses d'écoulement sont moins élevées en période de basses eaux qu'en période de hautes eaux. L'injection des traceurs en période de relativement hautes eaux est recommandée pour déterminer les vitesses d'écoulement lorsque les conditions sont défavorables pour la qualité des eaux.

Quantité de traceur à injecter: La restitution des traceurs dans les milieux fissurés est souvent assez mauvaise (de l'ordre de quelques %) et les pics peuvent se prolonger sur une longue période (plusieurs semaines) en raison d'une dispersion importante. Il est donc important d'injecter une quantité suffisante de traceur. Pour un même débit qu'en milieu karstique ou poreux, une plus grande masse de traceur doit être utilisée (p.ex. 5x plus).

Eau d'injection: Le volume injecté doit être suffisant pour pousser le traceur vers la zone saturée, mais ne doit pas être trop important, afin d'éviter de créer des gradients hydrauliques démesurés. Deux à cinq mètres

cubes sont généralement suffisants pour garantir une bonne pénétration du traceur dans la zone saturée.

Echantillonnage: Les risques de contamination lors d'essais de traçage doivent être réduits au maximum, c'est pourquoi la personne responsable des prélèvements ne doit pas avoir été en contact avec les traceurs. Le prélèvement d'un échantillon avant le traçage est également indispensable. Il est conseillé d'analyser cet échantillon « blanc » avant d'organiser l'essai de traçage pour mettre en évidence l'effet résiduel d'autres traceurs ou la présence d'une substance (matière organique, azurants optiques) pouvant perturber l'analyse du traceur choisi.

La cadence d'échantillonnage doit être élevée au début puis peut être progressivement espacée. Un échantillonnage serré lors de la première période de fortes précipitations suivant l'injection du traceur est indispensable.

Remarques: Dans le cas de la délimitation de l'isochrone de 10 jours, seule la vitesse horizontale doit être en principe prise en considération. Le traceur doit donc être injecté le plus près possible de la zone saturée. En présence d'une couche protectrice efficace, homogène et d'une épaisseur de plusieurs mètres, on peut cependant tenir compte du temps de transit vertical et de l'effet épurateur dans la zone non saturée (Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines, OFEFP 2004).

Dans le cas où une méthode de cartographie de la vulnérabilité est utilisée, d'éventuels essais réalisés à titre de contrôle devraient être effectués dans des conditions naturelles, sans modifier la couverture protectrice.

Pour d'autres informations sur la réalisation et l'interprétation des essais de traçages, il convient de mentionner le guide pratique « Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie » (Schudel et al. 2002).

Annexe 5 Caractérisation des sols (sols au sens pédologique et roches meubles)

A Pouvoir épurateur de différents types de sol en condition non-saturée (Rehse 1977)

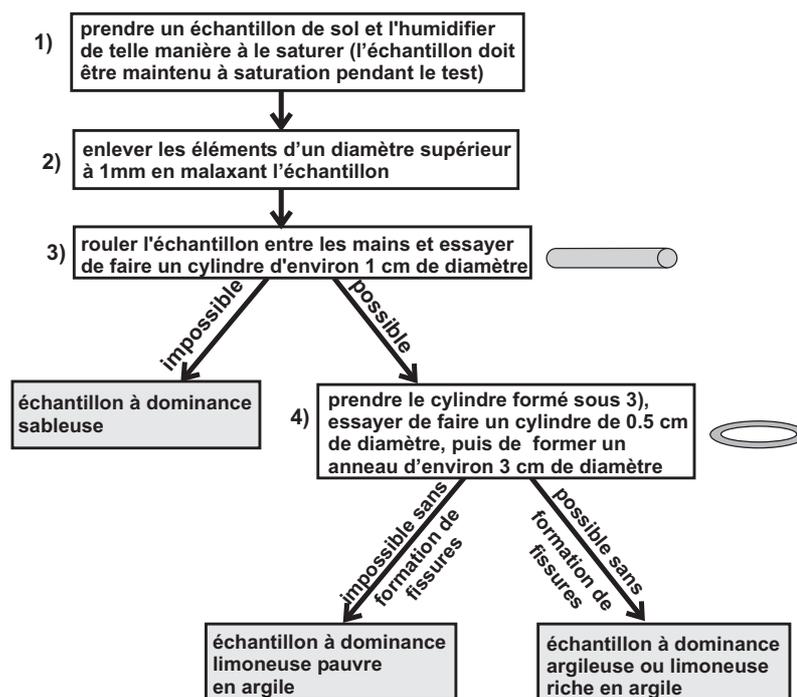
M	Description du matériau	H (m)	I = 1/H
1	Humus, 5 - 10 % humus, 5 - 10 % argile	1.2	0.8
2	Argile sans fentes de retrait, limon argileux, sable très argileux	2	0.5
3	Silt argileux à silt	2.5	0.4
4	Silt; sable silteux; sable silteux et peu argileux	3.0 - 4.5	0.33 - 0.22
5	Sable fin à moyen	6	0.17
6	Sable moyen à grossier	10	0.1
7	Sable grossier	15	0.07
8	Gravier silteux, riche en sable et argile	8	0.13
9	Gravier peu silteux, beaucoup de sable	12	0.08
10	Gravier fin à moyen riche en sable	25	0.04
11	Gravier moyen à grossier, peu de sable	35	0.03
12	Galets	50	0.02

M = n° de la classification granulométrique

H = épaisseur de la couche de sol nécessaire pour une épuration complète

I = index

B Classification grossière des sols par une rapide évaluation de leurs propriétés plastiques (pour une analyse et une classification plus détaillée, voir McRae 1988)



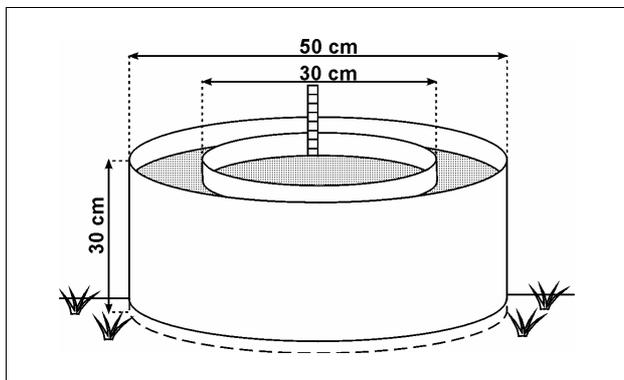
Annexe 6 Essais d'infiltration (évaluation de la perméabilité de la couverture protectrice)

Dans l'ensemble de cette annexe, on entend par perméabilité le coefficient de perméabilité de Darcy.

Essai d'infiltration avec double anneau (selon Müntz)

Dispositif: Il s'agit de deux cylindres en métal qui doivent être assez robustes pour être enfoncés de quelques centimètres dans le sol à l'aide d'une massette.

Mise en œuvre: Après saturation du sol, la vitesse d'infiltration est mesurée dans le cylindre intérieur tandis qu'une charge comparable à celle de ce dernier cylindre est maintenue dans l'anneau extérieur pour limiter au maximum l'effet de la perméabilité horizontale (généralement élevée dans les sols stratifiés).



Interprétation: La variation du niveau d'eau au cours du temps dans l'anneau intérieur est reportée sur un graphe. La perméabilité verticale du sol, exprimée en m/j , est donnée par la pente de la droite une fois le régime permanent atteint.

Cette méthode a l'avantage de déterminer essentiellement la perméabilité verticale de la couverture protectrice sans en perturber la structure.

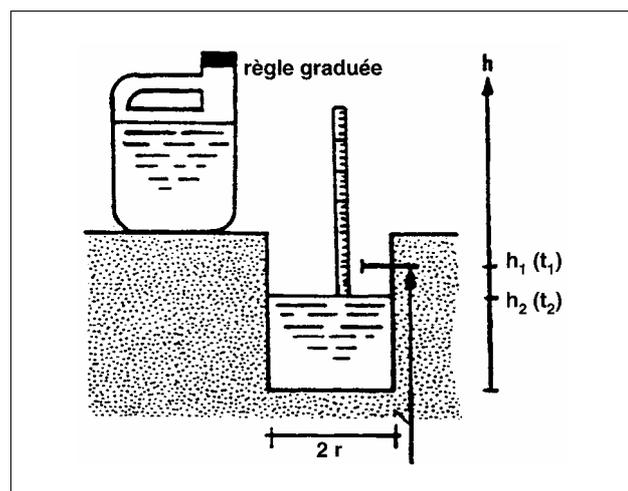
Remarque: Plus le diamètre de l'anneau extérieur est grand, plus la mesure sera précise (Hachicha et al. 1996).

Essai d'infiltration à niveau variable (selon Porchet)

Dispositif: L'essai peut être effectué dans un trou creusé à la tarière ou dans une fouille.

Mise en œuvre: Après saturation du sol, la variation du niveau d'eau est mesurée en fonction du temps.

Interprétation: La perméabilité du sol est déterminée par la formule suivante pour un trou cylindrique:



$$K = \frac{r}{2(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1 + r/2}{h_2 + r/2}$$

(tiré de Lallemand-Barrès & Roux 1999)

Cette méthode a l'avantage d'une mise en œuvre simple dans le cas d'essais dans un trou de tarière. L'utilisation d'une tête de diamètre élevé (min. 10 cm) est conseillée pour faciliter la mesure du niveau d'eau et étudier une surface horizontale assez grande. Les désavantages sont la mesure de la perméabilité à une certaine profondeur dans la couverture protectrice et la détermination d'une perméabilité globale (verticale + horizontale).

Vitesse et temps de séjour dans le sol

Connaissant la perméabilité du sol, la vitesse approximative de l'eau dans le sol en condition saturée peut être évaluée sur la base d'une estimation de la porosité efficace ω_e :

$$\text{Si } \omega_e = 10\% \text{ et } K_{\text{sol}} = 0.3 \text{ m/j,}$$

$$\text{Vitesse} = 0.3 / 0.1 = 3 \text{ m/j.}$$

Remarque: La présence de petits conduits dans les premiers décimètres de la couche de sol (terriers de rongeurs notamment) peut conduire à l'infiltration rapide d'eau vers l'aquifère. Puisque l'essai d'infiltration ne permet d'étudier qu'une petite surface, la perméabilité peut être sous-estimée.

Interprétation des résultats

De manière générale, un sol peut être considéré comme fortement perméable pour des valeurs de perméabilité supérieures à 1 m/j ($>10^{-5}$ m/s), comme moyennement perméable pour des valeurs comprises entre 0.1 et 1 m/j (10^{-6} à 10^{-5} m/s) et comme faiblement perméable pour des valeurs inférieures à 0.1 m/j ($<10^{-6}$ m/s).