

GUIDE PRATIQUE

Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK)

1998



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

GUIDE PRATIQUE

Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK)

Application aux zones de protection
des eaux souterraines

**Publié par l'Office fédéral
de l'environnement, des forêts
et du paysage OFEFP
Berne, 1998**

Impressum

Auteurs

Nathalie Doerfliger
François Zwahlen
Université de Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie
Rue Emile-Argand 11
2007 Neuchâtel

Groupe d'experts

Jean-Pierre Tripet*, président
Service hydrologique et géologique national
Pierre-Alain Gretillat*
Université de Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie
Daniel Hartmann
OFEFP, Division Protection des eaux et pêche
Benjamin Meylan
OFEFP, Division Protection des eaux et pêche
Christian Schlüchter*
Université de Berne, Institut de géologie
Gianni della Valle*
OEHE, Division géologie, Berne
Andres Wildberger*
Dr von Moos AG, Zürich
Jürg Zobrist*
IFAEPE/EAWAG, Dübendorf

* *Délégué de la Société suisse d'hydrogéologie*

Rédaction, mise en forme et réalisation

François Pasquier
Hydrogéologue-conseil
2108 Couvet

Photo de couverture Morphologie karstique (épikarst). Sieben Hengste, Berne, Suisse.
(photo V. Puesch)

Remarque Cette publication existe aussi en allemand
N° de commande :

Commande Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
Documentation
3003 Berne
Fax + 41 (0)31 324 02 16
E-mail : docu@buwal.admin.ch
Internet : <http://www.admin.ch/buwal/publikat/f/>

Numéro de commande VU-2504-F

© OFEFP 1998 6.99 600 9989

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Abstracts (<i>fr., all., it., angl.</i>)	4
Préface	6
Vorwort	7
Prefazione	8
Résumé étendu	9
Zusammenfassung	11
1 Introduction	13
2 Vulnérabilité des captages en milieu karstique	14
3 La méthode multicritère - méthode EPIK	19
3.1 Evaluation des 4 critères E,P,I et K	20
3.2 Calcul du facteur de protection F	28
3.3 Délimitation des zones de protection	30
3.4 Ajustement et vérification de la méthode	31
4 Exemples d'application : 2 cas d'études	32
4.1 Exemple du bassin des sources de St-Imier	32
4.2 Exemple du bassin des sources de Blatti - La Lenk	40
4.3 Aspects financiers	47
5 Conclusions et perspectives	48
6 Annexes	49
1 Carte de l'épikarst - morphologie karstique - du bassin d'alimentation des sources de St-Imier - partie bernoise du bassin d'alimentation.	50
2 Carte de la couverture protectrice du bassin d'alimentation des sources de St-Imier - partie bernoise du bassin d'alimentation.	51
3 Carte des conditions d'infiltration du bassin d'alimentation des sources de St-Imier - partie bernoise du bassin d'alimentation.	52
4 Carte de l'épikarst - morphologie karstique - du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.	53
5 Carte de la couverture protectrice du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.	53
6 Carte des conditions d'infiltration du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.	54
7 Carte du développement du réseau karstique du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.	54
7 Bibliographie	55

ABSTRACTS

Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK)

La méthode multicritère EPIK a été établie pour cartographier de manière générale la vulnérabilité des aquifères karstiques et plus spécifiquement celle des bassins d'alimentation des sources ou captages en milieu karstique. La carte de vulnérabilité obtenue constitue ainsi une base indispensable pour la délimitation des zones de protection.

Basée sur l'organisation spécifique des écoulements dans les aquifères karstiques, cette méthode prend en compte 4 critères: 1) développement de l'Epikarst, 2) importance de la couverture Protectrice, 3) conditions d'Infiltration et 4) développement du réseau Karstique.

On évalue chaque critère en le qualifiant par des indices, qui sont cartographiés sur l'ensemble du bassin d'alimentation des sources ou captages considérés. A chaque critère indexé, on attribue une valeur en fonction du rôle protecteur qu'il représente. L'addition des valeurs obtenues pour chacun des critères fournit la valeur du facteur de protection F pour chaque élément de surface du bassin d'alimentation étudié. De cette manière on obtient, sous forme d'une carte de vulnérabilité, une représentation de la répartition du facteur F pour l'ensemble du bassin. Cette opération peut se faire manuellement ou à l'aide d'un système d'information géographique. Grâce à une relation d'équivalence, on peut transformer de manière rigoureuse le document obtenu en carte des zones de protection S1, S2 et S3.

Cette méthode a été ajustée sur plusieurs sites en milieu karstique en Suisse (différents types de karst) où se posaient des problèmes de contamination des sources essentiellement dus à l'agriculture. Les cartes de vulnérabilité ont permis d'établir de nouvelles zones de protection, vérifiées à l'aide d'essais de traçage et d'investigations géophysiques.

Mots-clés : Eaux souterraines, karst, vulnérabilité captages, cartographie, zones de protection, Suisse, EPIK.

Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK)

EPIK ist eine Multikriterien-Methode zur kartographischen Erfassung der Vulnerabilität in Einzugsgebieten von Karstquellen und Karst-Grundwasserfassungen. Vulnerabilitätskarten bilden die Grundlage für die Ausscheidung der Grundwasserschutz-zonen in Karstgebieten.

Die EPIK-Methode trägt der spezifischen Grundwasserdynamik in Karstaquiferen Rechnung. Berücksichtigt werden vier Kriterien: (1) Entwicklung des Epikarsts, (2) Schutzwirkung der Deckschicht (Protection), (3) Infiltrationsverhältnisse und (4) Entwicklung des Karstnetzes.

Für jedes Flächenelement eines Untersuchungsgebietes werden für jedes der vier Kriterien E, P, I und K die zugehörigen Indizes ermittelt und separat auskartiert. Jedes Kriterium ist zudem, in Abhängigkeit seiner Schutzfunktion, mit einem Koeffizienten gewichtet. Die Summe der ermittelten Werte ergibt den Schutzfaktor F für jedes Flächenelement. Aus der räumlichen Verteilung von F resultiert eine Vulnerabilitätskarte, welche manuell oder mittels eines GIS erstellt werden kann. F-Werte können direkt und in nachvollziehbarer Weise zur Ausscheidung der Grundwasserschutz-zonen S1, S2 und S3 verwendet werden.

Die EPIK-Methode wurde im Rahmen mehrerer Pilotstudien in verschiedenen Gebieten der Schweiz mit unterschiedlichen Karsttypen - im Zusammenhang mit periodischen Verschmutzungen des Trinkwassers durch die Landwirtschaft - geprüft. Dabei ermöglichten die Vulnerabilitätskarten die Ausscheidung neuer Schutz-zonen, die in der Folge durch Markierversuche und geophysikalische Untersuchungen verifiziert wurden.

Stichworte : Grundwasser, Karst, Vulnerabilität, kartographische Aufnahme, Grundwasserschutz-zonen, Schweiz, EPIK.

Cartografia della vulnerabilità in regioni carsiche (EPIK)

Il metodo a più criteri EPIK è stato concepito allo scopo di cartografare in generale la vulnerabilità degli acquiferi carsici e in particolare quella dei bacini di alimentazione delle sorgenti o captazioni in regioni carsiche. La carta della vulnerabilità ottenuta costituisce una base indispensabile alla delimitazione delle zone di protezione.

Tale metodo, basato sull'organizzazione specifica del deflusso negli acquiferi carsici, prende in considerazione quattro criteri: 1) lo sviluppo dell'Epicarso, 2) l'importanza della copertura di Protezione, 3) le condizioni d'Infiltrazione, 4) lo sviluppo della rete carsica (Karst).

Ogni criterio viene valutato in base a una qualificazione per indici che sono cartografati sull'insieme del bacino di alimentazione delle sorgenti o captazioni considerate. A ogni criterio indicizzato viene attribuito un valore in funzione del ruolo di protezione che esso rappresenta. L'addizione dei valori ottenuti per ciascun criterio fornisce il valore del fattore di protezione F per ciascun elemento della superficie del bacino di alimentazione studiato. In questo modo si ottiene, sotto forma di una carta della vulnerabilità, una rappresentazione della ripartizione del fattore F per l'insieme del bacino. Tale operazione può essere svolta manualmente o con l'aiuto di un sistema d'informazione geografica. Grazie a una relazione di equivalenza è possibile trasformare in modo rigoroso il documento ottenuto in carte delle zone di protezione S1, S2, S3.

Detto metodo è stato adattato su diversi siti carsici in Svizzera (tipi differenti di carso) in cui vi erano problemi di inquinamento delle sorgenti dovuti essenzialmente all'agricoltura. Le carte di vulnerabilità hanno permesso di stabilire nuove zone di protezione che sono state valutate per mezzo di prove con traccianti e di analisi geofisiche.

Parole chiave : *acque sotterranee, carso, vulnerabilità delle captazioni, cartografia, zone di protezione, Svizzera, EPIK.*

Vulnerability mapping in karst areas (EPIK)

EPIK is a multiparameter method that was developed as an aid in mapping groundwater vulnerability in karst regions, with special respect to catchment areas of sources. Groundwater vulnerability maps based on this method are an indispensable tool for establishing groundwater protection zones.

EPIK is based on the specific groundwater dynamics in karst aquifers. Four parameters are taken into account: (1) Development of the Epikarst, (2) effectiveness of the Protective cover, (3) conditions of Infiltration and (4) development of the Karst network.

After having been given a quality-ranking index, each of the four parameters is mapped throughout the groundwater catchment area. A weighting coefficient is then attributed to each of the indexed parameters according to their degree of protection against contamination. By adding the protection values of each parameter a protection factor F for each surface element of the catchment area is calculated. In this way a groundwater vulnerability map is produced, representing the spatial distribution of F. F may be determined manually or by means of a GIS. Furthermore, F values can be used to establish the groundwater protection zones S1, S2 and S3 in an objective manner.

The EPIK method was adjusted in several pilot studies in different types of karst in Switzerland where groundwater is polluted mainly by agricultural activities. The groundwater vulnerability maps allowed the establishment of new protection zones, which were subsequently verified by tracer tests and geophysical investigations.

Key words : *Groundwater, karst hydrology, vulnerability, mapping, source protection zones, Switzerland, EPIK.*

PRÉFACE

Dans le but d'assurer la qualité des eaux potables du pays, la loi sur la protection des eaux exige que des zones de protection des eaux souterraines soient délimitées autour des captages d'intérêt public. Pour les aquifères à porosité d'interstice, le dimensionnement de ces zones de protection est basé sur la distance parcourue par l'eau, pendant une durée déterminée, avant d'arriver au captage. La détermination de cette distance, et donc le dimensionnement des zones de protection, sont généralement effectués sur la base de mesures spécifiques réalisées dans le cadre d'une étude hydrogéologique.

Dans les aquifères karstiques, la répartition des vitesses de circulation des eaux souterraines est très hétérogène, de sorte que le risque de pollution de l'eau captée ne diminue pas régulièrement avec l'éloignement du captage, comme c'est généralement le cas pour les aquifères à porosité d'interstice. De plus, les vitesses de circulation des eaux souterraines karstiques sont très variables en fonction des conditions atmosphériques. Le critère temps utilisé pour la délimitation des zones de protection dans les aquifères à porosité d'interstice n'est donc pas applicable aux aquifères karstiques.

Avec la présente publication, on a voulu jeter les bases d'une délimitation hydrogéologiquement fondée des zones de protection dans les régions karstiques. La méthode proposée n'est pas basée sur la détermination des vitesses de circulation des eaux souterraines, mais sur l'évaluation d'un certain nombre de critères hydrogéologiques caractérisant le degré de protection des eaux souterraines dans les différentes parties du bassin d'alimentation d'un captage. Les zones de protection sont par conséquent délimitées sur la base de leur sensibilité à la pollution des eaux souterraines, autrement dit, de la vulnérabilité des eaux souterraines.

Cette méthode a été développée par le Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel dans le cadre d'un mandat de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEP) et du Service hydrologique et géologique national (SHGN). Un groupe de travail composé de membres de la Société suisse d'hydrogéologie a été chargé d'accompagner le projet, en collaboration avec la division Protection des eaux et pêche de l'OFEP et avec le SHGN.

Cette publication s'adresse aux autorités, aux géologues et ingénieurs conseils, ainsi qu'aux spécialistes de la recherche.

VORWORT

Zum Schutz der im öffentlichen Interesse liegenden Trinkwasserfassungen vor Verschmutzungen verlangt das Gewässerschutzgesetz die Ausscheidung von Grundwasserschutz-zonen. Die Dimensionierung dieser Schutz-zonen beruht in Lockergesteins-Grundwasserleitern auf einer bestimmten Fliesszeit, welche das Grundwasser braucht, um zur Fassung zu gelangen. Die Bestimmung dieser Fliesszeit - und damit auch die Bemessung der Grundwasserschutz-zonen - erfolgt in der Regel aufgrund eindeutiger Resultate einer hydrogeologischen Untersuchung.

In Karst-Grundwasservorkommen sind die Fliessgeschwindigkeiten des Grundwassers sehr heterogen, sodass die Gefahr einer Verschmutzung des gefassten Wassers nicht generell mit zunehmender Entfernung des Gefahrenherdes abnimmt, wie dies bei Lockergesteins-Grundwasser normalerweise der Fall ist. Zudem wird die Fliessgeschwindigkeit des Karst-Grundwassers von den meteorologischen Verhältnissen beeinflusst. Das Kriterium der Grundwasserfliesszeit ist demnach für die Ausscheidung von Grundwasserschutz-zonen in Karst-Grundwassergebieten grundsätzlich ungeeignet.

Mit der vorliegenden Publikation - welche sich an Fachbehörden, beratende Geologen und Ingenieure sowie an Fachkreise in der Forschung wendet - wird dem Bedürfnis nachgekommen, die Ausscheidung von Grundwasserschutz-zonen in Karstgebieten auf eine hydrogeologisch fundierte Basis zu stellen. Es wird eine Methode zur Ausscheidung von Grundwasserschutz-zonen vorgestellt, die nicht auf der Bestimmung von Grundwasserfliessgeschwindigkeiten, sondern auf der Beurteilung verschiedener hydrogeologischer Kriterien beruht, die den Schutz des Grundwassers für die verschiedenen Teilgebiete des Einzugsgebiets einer Fassung kennzeichnen. Die Grundwasserschutz-zonen werden also aufgrund der Vulnerabilität (Empfindlichkeit in Bezug auf eine Verschmutzung des Trinkwassers) ausgeschrieben.

Diese Methode wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und der Landeshydrologie und -geologie (LHG) durch das "Centre d'hydrogéologie" an der Universität von Neuenburg entwickelt. Eine Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitgliedern der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie, in Zusammenarbeit mit der Abteilung Gewässerschutz und Fischerei des BUWAL und der LHG, begleitete das Projekt.

PREFAZIONE

Al fine di proteggere l'acqua potabile dall'inquinamento, la legge sulla protezione delle acque prevede per le captazioni di interesse pubblico, la delimitazione di zone di protezione delle acque sotterranee. Le dimensioni di tali zone di protezione sono basate, per acquiferi di roccia sciolta, su un determinato tempo di scorrimento delle acque sotterranee per raggiungere la captazione. La determinazione di questo tempo di scorrimento - e quindi anche delle zone di protezione delle acque sotterranee - avviene in linea di principio sulla base di risultati inequivocabili di un'indagine idrogeologica.

Nelle acque sotterranee dei terreni carsici, i tempi di scorrimento delle acque sono molto eterogenei, tanto che il pericolo di un inquinamento delle acque captate, non diminuisce di norma con l'aumento della distanza della fonte di pericolo, com'è il caso per una falda in roccia sciolta. Inoltre, il tempo di scorrimento delle acque sotterranee nei terreni carsici viene influenzato dalle condizioni meteorologiche. Pertanto, il criterio del tempo di scorrimento delle acque sotterranee, è fondamentalmente inadeguato per la delimitazione di zone di protezione delle acque sotterranee in terreni carsici.

Con la presente pubblicazione - destinata alle autorità competenti, ai geologi e agli ingegneri consulenti, nonché ai ricercatori interessati - si viene incontro all'esigenza di basare la delimitazione delle zone di protezione delle acque sotterranee in terreni carsici su criteri idrogeologici. Viene presentato un metodo di delimitazione delle zone di protezione delle acque sotterranee nei terreni carsici che non è basato sulla determinazione dei tempi di scorrimento, ma sulla valutazione di vari criteri idrogeologici che caratterizzano la protezione delle acque sotterranee dei diversi settori del bacino imbrifero di una captazione. Le zone di protezione delle acque sotterranee vengono dunque delimitate sulla base della vulnerabilità riguardo all'inquinamento dell'acqua potabile.

Questo metodo è stato elaborato dal Centre d'hydrogéologie dell'Università di Neuchâtel su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio (UFARP) e del Servizio idrologico e geologico nazionale (SIGN). Un gruppo ad hoc composto da membri della Società svizzera di idrogeologia, in collaborazione con la Divisione protezione delle acque e pesca dell'UFARP e del SIGN ha seguito i lavori.

RÉSUMÉ ÉTENDU

Les eaux souterraines provenant des aquifères karstiques jouent, pour de larges régions de Suisse, un rôle décisif dans l'approvisionnement en eau potable. Afin de faciliter l'application de la loi fédérale sur la protection des eaux de 1991 (RS 814.20), des études destinées à améliorer la protection des eaux souterraines dans les régions karstiques ont été réalisées. On constate, entre autres, que les zones de protection établies en régions karstiques manquent, fréquemment, de fondement hydrogéologique et, pour cette raison, montrent souvent une efficacité limitée. Dans ces conditions, il n'est pas rare que des pollutions se produisent. Pour remédier à cette situation, l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), en collaboration avec le Service hydrologique et géologique national, a cherché une nouvelle approche de la délimitation des zones de protection dans les régions karstiques, qui tienne compte des connaissances les plus récentes relatives au modèle conceptuel de l'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères karstiques, et qui conduise à des zones de protection fondées au point de vue hydrogéologique et établies selon des critères rigoureux. De telles zones de protection sont alors à même de satisfaire aux buts d'une stratégie de protection des eaux souterraines agissant sur l'utilisation du territoire.

Ainsi, une nouvelle méthode, appelée "EPIK", a été développée par le Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Elle est basée sur l'évaluation et le lever cartographique de la vulnérabilité du bassin d'alimentation des captages. La vulnérabilité est définie, ici, comme une propriété intrinsèque des aquifères, qui exprime la sensibilité de ces derniers aux impacts naturels et anthropogènes. La méthode se veut rigoureuse; elle est basée sur des critères géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques. De plus, elle est indépendante de l'occupation du sol actuelle ou future et des considérations économiques.

La méthode EPIK est une méthode multicritère à indices. Elle repose sur une carte de la vulnérabilité du bassin d'alimentation d'une source ou d'un puits de captage donné, qui prend en compte les quatre critères objectifs suivants: développement de l'épikarst ("E", un domaine du sous-sol voisin de la surface du terrain, intensément karstifié et de perméabilité très élevée), propriétés de la couverture protectrice ("P"), conditions d'infiltration ("I", infiltration diffuse ou ponctuelle) et développement du réseau karstique ("K"). Ces critères sont nécessaires et suffisants pour définir la vulnérabilité.

Après la délimitation du bassin d'alimentation de la source ou du captage étudié, la méthode se déroule en trois étapes:

- a) évaluation semi-quantitative et lever cartographique de chacun des quatre critères mentionnés;
- b) calcul de la valeur d'un "facteur de protection", par combinaison et pondération de la valeur des quatre critères, pour chaque surface unitaire du bassin d'alimentation;
- c) représentation cartographique de la répartition du facteur de protection pour l'ensemble du bassin d'alimentation; grâce à une relation d'équivalence entre ce facteur et les zones de protection, la carte obtenue permet de délimiter de manière rigoureuse les zones définies par la législation suisse en matière de protection des eaux (S1, S2 et S3).

La méthode EPIK a fait l'objet de tests et d'ajustements sur plusieurs sites en Suisse (St-Imier, Bure, St-Gingolph et La Lenk), dans différents contextes géologiques, où des problèmes de contamination des sources dus à l'agriculture se posent régulièrement. L'utilisation de la méthode dans le cas de deux de ces zones tests, dans le Jura plissé et

dans les Alpes helvétiques, est présentée dans ce rapport. Les exemples d'application ont démontré la faisabilité et l'intérêt de cette nouvelle approche. La contamination des aquifères karstiques n'est pas une fatalité. Des zones de protection délimitées en adéquation avec le fonctionnement hydrogéologique du karst, combinées avec leurs mesures de protection respectives, peuvent à l'évidence réduire considérablement les risques de pollution. La méthode EPIK, basée sur des critères hydrogéologiques spécifiques, doit permettre une meilleure protection des sources et captages en milieu karstique. L'OFEFP a tenu compte du résultat de ces études dans la nouvelle ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (RS 814.201).

ZUSAMMENFASSUNG

Wasser aus Karst-Grundwasservorkommen bildet in zahlreichen Regionen der Schweiz eine wichtige Ressource für die Trinkwasserversorgung. Die in diesen Gebieten aufgrund von Artikel 20 des Gewässerschutzgesetzes (SR 814.20) ausgeschiedenen Grundwasserschutzzonen weisen mangels hydrogeologischer Grundlagen oftmals nur eine beschränkte Schutzwirkung auf, sodass Trinkwasserverschmutzungen in Karstgebieten keine Seltenheit darstellen. Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) in Zusammenarbeit mit der Landeshydrologie und -geologie (LHG) hat deshalb nach einem neuen Ansatz für die Ausscheidung von Schutzzonen im Karstmilieu gesucht. Dabei sollten die neusten Erkenntnisse über die hydraulischen Verhältnisse in Karstaquiferen berücksichtigt werden und die Ausscheidung der Schutzzonen auf nachvollziehbaren Kriterien beruhen. Mit solchen Schutzzonen kann, zum Schutz der Grundwasser-Ressourcen, gezielt auf die Bodennutzung Einfluss genommen werden.

Die sog. EPIK-Methode, welche am "Centre d'hydrogéologie" der Universität von Neuenburg entwickelt wurde, basiert auf der Abschätzung und der kartographischen Erfassung der Vulnerabilität (Empfindlichkeit in Bezug auf eine Verschmutzung des Trinkwassers) im Einzugsgebiet von Fassungen. Die Vulnerabilität wird dabei als eine den Aquiferen immanente Eigenschaft definiert, welche ein Mass für die Sensibilität eines Grundwasserleiters auf natürliche und anthropogene Einflüsse darstellt. Die Methode basiert auf geologischen, geomorphologischen und hydrogeologischen Kriterien und ist unabhängig von der momentanen resp. künftigen Nutzung des Bodens sowie von wirtschaftlichen Überlegungen.

Die EPIK-Methode berücksichtigt im jeweiligen Einzugsgebiet einer Quelle oder einer Fassung die vier folgenden, objektiven Kriterien: Ausbildung des Epikarsts ("E"; oberflächennaher, stark verkarsteter Bereich des Kalkuntergrundes, der eine stark erhöhte Wasserdurchlässigkeit aufweist), Schutz (Protektion) durch die Deckschicht ("P"), Infiltrationsverhältnisse ("I"; diffuse resp. konzentrierte Infiltration) und Entwicklung des Karstnetzes ("K"). Diese vier Kriterien sind notwendig und ausreichend für die Ermittlung der Vulnerabilität.

Nach der Bestimmung des Einzugsgebietes der zu schützenden Quelle resp. der Fassung wird in drei Schritten vorgegangen:

- a) Ermittlung der Indizes der vier erwähnten Kriterien und deren separate Auskartierung;
- b) Berechnung des Schutzfaktors für jede Teilfläche des Einzugsgebietes, indem die ermittelten Indizes der vier Kriterien verknüpft und gewichtet werden;
- c) kartographische Darstellung der Verteilung des Schutzfaktors für das gesamte Einzugsgebiet; dank der klaren Beziehung zwischen diesem Faktor und den Schutzzonen erlaubt die Karte die Ausscheidung der Grundwasserschutzzonen S1, S2 und S3 auf eine nachvollziehbare Weise.

Die Methode wurde, im Zusammenhang mit periodischen Verschmutzungen von Trinkwasser durch die Landwirtschaft, in mehreren Gebieten der Schweiz mit unterschiedlichen Karsttypen (St-Imier, Bure, St-Gingolph und Lenk) getestet und angepasst. Die Anwendung der Methode in zwei dieser Testgebiete - das eine liegt im Faltenjura, das andere im Helvetikum - wird in diesem Bericht dargelegt. Die Anwendungsbeispiele zeigen die Durchführbarkeit des neuen Ansatzes. Verunreinigungen von Karstgrundwasserleitern sind nicht schicksalhaft. Die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen, welche den hydrogeologischen Eigenschaften des Karsts Rechnung tragen, in Verbin-

dung mit den entsprechenden Schutzmassnahmen, können das Risiko einer Verschmutzung stark reduzieren. Die auf spezifischen hydrogeologischen Kriterien beruhende EPIK-Methode erlaubt in Zukunft einen besseren Schutz von Quellen und Fassungen in Karstgebieten. Das BUWAL hat die Resultate dieser Studie in der neuen Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (SR 814.201) berücksichtigt.

1 INTRODUCTION

Les ressources en eaux souterraines des *aquifères karstiques* sont importantes pour l'approvisionnement en eau de nombreuses régions de la Suisse, telles que le Jura, le flanc nord des Alpes et quelques régions dans le sud-est du pays (domaine austroalpin). Dans ces régions, les activités agricoles et forestières sont fréquentes et dans de nombreux cas, l'industrie et le tourisme jouent un rôle prépondérant quant au développement économique de la région. Du point de vue de leur qualité, les eaux des aquifères karstiques en Suisse ne posent pas de manière générale de problèmes majeurs; souvent un traitement simple des eaux (floculation, sédimentation, filtration, désinfection) est suffisant pour l'approvisionnement en eau potable. Cependant la qualité peut être altérée à la suite de périodes de crues par une augmentation de la turbidité ou de la teneur en matière organique. D'autre part, les ressources en eau en milieu karstique sont sensibles aux impacts anthropogènes. Par conséquent, elles sont généralement considérées comme vulnérables.

Cette *vulnérabilité* s'explique notamment par la structure fortement hétérogène des aquifères karstiques, avec d'une part une alimentation de surface soit diffuse soit concentrée, et d'autre part soit des perméabilités très élevées dans les conduits souterrains, soit des perméabilités faibles dans les blocs peu perméables. Cette "double dualité" se manifeste par un comportement hydrodynamique tout à fait caractéristique: les crues, dues à d'importantes infiltrations concentrées dans des zones très perméables, sont rapides et violentes. Les processus de filtration ou d'auto-épuration des polluants n'ont pas le temps de se développer, comme c'est le cas dans les aquifères à porosité d'interstices. Du fait de leur fonctionnement spécifique, les aquifères karstiques requièrent une protection toute particulière.

La *législation* suisse 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 de zones de protection pour tous captages (sources ou puits) et installations d'alimentation artificielle des eaux souterraines qui sont d'intérêt public. L'application de la loi incombe aux cantons, sur la base d'ordonnances 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 3 zones de protection. Ces zones appelées S1, S2 et S3 sont accompagnées d'un règlement relatif à l'occupation et à l'utilisation du territoire.

Zones de protection des eaux souterraines

Zone S1: Elle doit permettre d'éviter des dégâts aux installations de captage ou d'alimentation artificielle des eaux souterraines, ainsi que des pollutions dans leur environnement immédiat.

Zone S2: Elle a pour rôle de tenir à l'écart du captage la contamination microbiologique; elle doit également permettre d'éviter que l'eau captée soit polluée par des excavations et des travaux souterrains, et que l'écoulement de l'eau souterraine 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 menaçait d'entrer en contact direct avec l'eau souterraine, par exemple lors d'un accident mettant en cause des substances de nature à polluer les eaux.

Les zones de protection des eaux souterraines doivent permettre de garantir les objectifs de prévention (voir encadré).

Les *zones de protection* établies en régions karstiques manquent fréquemment de fondement hydrogéologique. Notamment, des critères objectifs nécessaires à la délimitation des zones S2 et S3 font défaut. Pour cette raison, les zones de protection montrent souvent une efficacité limitée. Depuis la parution des "Instructions pratiques pour la détermination des secteurs de protection des eaux, des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines" (Office fédéral de la protection de l'environnement, octobre 1977, révision partielle en 1982), les connaissances relatives au fonctionnement hydraulique du karst ont évolué de manière significative. C'est pourquoi, il s'est avéré nécessaire de développer une nouvelle approche, destinée à améliorer l'efficacité des moyens de prévention. La méthode de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu karstique à partir de différents critères spécifiques du comportement hydrodynamique du système doit répondre à cet objectif. Cette méthode se veut rigoureuse: elle est basée sur des critères géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques. De plus, elle est indépendante de l'occupation du sol actuelle ou future et des considérations économiques. Dans certains cas particuliers, notamment en présence de sous-bassins non karstiques et de zones urbanisées, la méthode devra être appliquée avec discernement.

2 VULNÉRABILITÉ DES CAPTAGES EN MILIEU KARSTIQUE

Fonctionnement du karst

Les aquifères karstiques sont caractérisés par des particularités géomorphologiques et des phénomènes hydrauliques spécifiques tels que l'existence d'importantes sources, de pertes, l'absence d'un réseau de drainage en surface, l'existence de réseaux karstiques résultant d'une dissolution des roches carbonatées; les hydrogrammes des sources sont typiques (crues rapides et violentes, décrue rapide, tarissement lent), et la qualité des eaux montre des variations de chimisme en fonction du débit.

A partir de ces caractéristiques générales, un aquifère karstique peut être schématisé de la manière suivante (Jeannin et al. 1993): *l'aquifère est constitué d'un réseau de conduits connexes (réseau karstique) aboutissant à des exutoires, et drainant ou alimentant des volumes de roche fissurée et fracturée de faible perméabilité.*

Des études de bilan hydraulique à l'échelle d'un bassin du karst jurassien suisse montrent que 75 à 50 % des pluies efficaces alimentent les *drains à circulation rapide* et que les 25 à 50 % restants s'infiltrent directement dans les *blocs peu perméables* qui assurent le débit d'écoulement des sources en période de tarissement (Jeannin & Graßo

Vulnérabilité

Le terme de vulnérabilité est défini et utilisé, dans la littérature scientifique, de manière très diverse. Pour la présente étude, la définition suivante a été adoptée:

La vulnérabilité est une propriété intrinsèque des aquifères qui dépend de la sensibilité de ces derniers aux impacts naturels et anthropogènes (Gilbrich & Zaporozec 1994). C'est une propriété générale non mesurable utilisée pour caractériser, à l'aide d'informations d'origine géologique et hydrogéologique, la sensibilité des systèmes aquifères souterrains aux contaminations anthropogènes, que ce soit sous forme ponctuelle ou diffuse.

Les sources de contaminants telles que les décharges, les citernes enterrées à huile de chauffage ou autres, les épandages potentiels d'huile résultant d'accidents de la route et les épandages d'engrais naturels ou artificiels sont ainsi globalement pris en considération.

1995). Les infiltrations rapides ne transitent pas par les blocs peu perméables, mais par des *points d'infiltration concentrée* tels que des pertes, reliés directement au réseau karstique, ainsi que par l'*épikarst*.

On définit l'*épikarst* comme une zone d'absorption très fissurée qui correspond à la décompression et à l'altération des terrains au voisinage de la surface (Dodge 1982). Cette zone supérieure du karst n'est pas continue: elle atteint une épaisseur de quelques décimètres voire quelques mètres et peut contenir un aquifère suspendu, qui concentre rapidement l'eau d'infiltration vers le réseau karstique (Mangin 1975).

Conséquences du fonctionnement du karst sur la vulnérabilité

La représentation schématique de l'aquifère karstique présentée à la *figure 1* correspond à un modèle conceptuel cohérent du comportement hydrodynamique et des processus de transport. C'est à partir de cette représentation que l'on définit la vulnérabilité. En étiage, l'eau des blocs peu perméables constitue l'essentiel du débit des sources. Cette eau a séjourné un temps relativement important dans l'aquifère et a transité en grande partie par des zones peu perméables. En hautes eaux, plus de la moitié des eaux d'infiltration résultant d'un événement pluvieux traverse rapidement l'aquifère au moyen d'importants conduits. Les processus de filtration sont donc faibles, mais la dilution d'éventuels contaminants est généralement élevée. La vulnérabilité dépend donc des conditions d'infiltration de l'aquifère (conditions aux limites), ainsi que de la répartition spatiale de la conductivité hydraulique et du coefficient d'emmagasinement (champ des paramètres physiques) qui jouent un rôle primordial sur les processus d'écoulement et de transport.

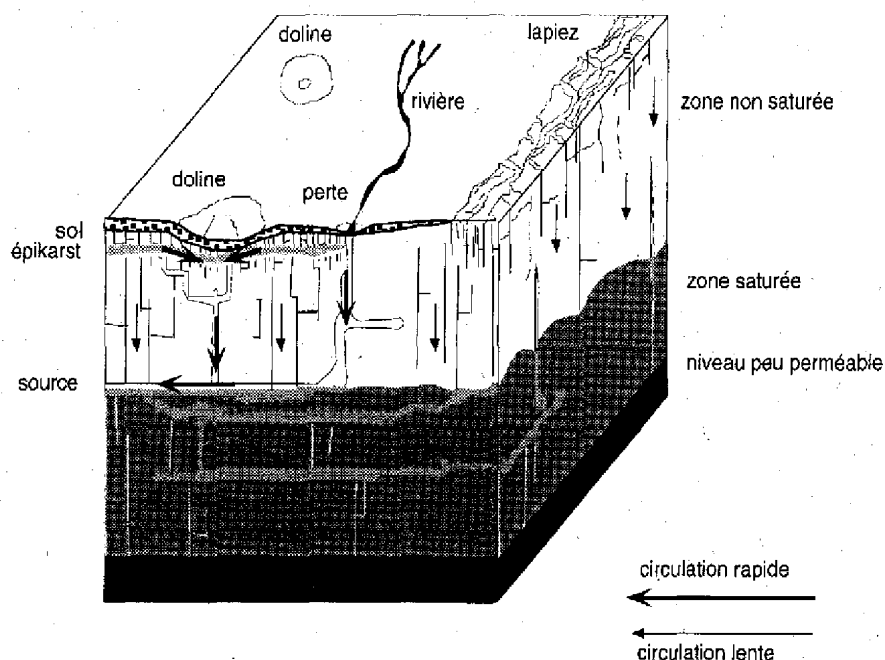


Figure 1. Représentation schématique du fonctionnement d'un aquifère karstique.

La répartition spatiale des paramètres physiques de l'aquifère et son effet sur la vulnérabilité des captages sont liés sur le terrain à deux critères prépondérants: le **réseau karstique** et l'**épikarst**. Le réseau karstique a une géométrie complexe en raison des nombreuses ramifications possibles dans l'espace tridimensionnel de la formation aquifère. Il peut être plus ou moins développé et ramifié, en fonction de son histoire géologique, hydrogéologique, chimique, physique et biologique.

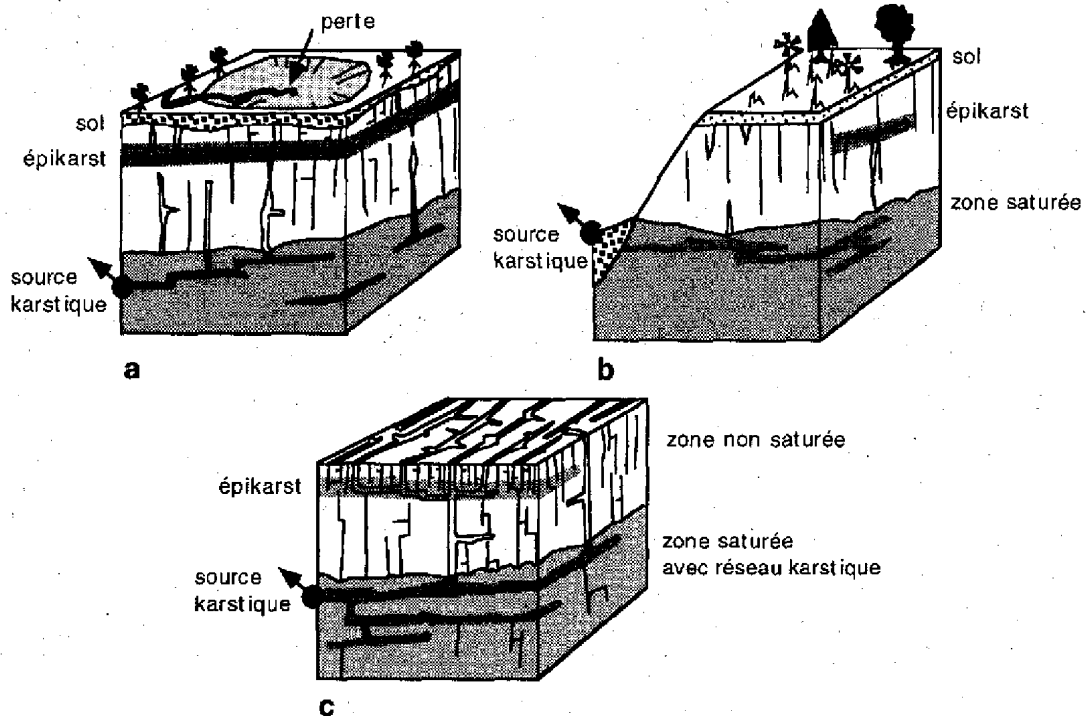


Figure 2a,b,c. Quelques exemples de combinaison des critères prépondérants pour la vulnérabilité des aquifères karstiques.

Le captage ou la source en milieu karstique sera en principe très vulnérable s'il existe un réseau karstique et un épikarst bien développé qui lui sont directement reliés au sein de l'aquifère (figure 2c). Le captage ou la source sera moins vulnérable si l'épikarst n'est pas directement relié au réseau karstique; en général, le captage sera encore moins vulnérable si l'aquifère ne contient pas de réseau karstique ni d'épikarst (il s'agit alors d'un aquifère fissuré non karstique). Ainsi, il est évident que la délimitation de zones de protection en milieu karstique ne peut s'effectuer à partir d'un seul critère. Au contraire la mise au point et l'utilisation d'une **méthode multicritère** tenant compte du fonctionnement spécifique du karst est indispensable pour atteindre l'objectif fixé.

Rôle de la couverture et des conditions d'infiltration

La **couverture** d'un aquifère est un des facteurs naturels de **protection** généralement pris en compte dans les méthodes de cartographie de la vulnérabilité. Elle est considérée comme exerçant une importante fonction d'atténuation (Zaporozec 1985) due notamment aux paramètres suivants: épaisseur, texture/structure, teneur en matière organique et en minéraux argileux, capacité d'échange cationique, teneur en eau et conductivité hydraulique.

Les *conditions d'infiltration* déterminent les modalités de recharge de l'aquifère. Elles peuvent être diffuses, concentrées ou intermédiaires. Dans ce dernier cas, elles sont définies par les propriétés de la surface de ruissellement (pente, coefficient de ruissellement) et par l'existence de zones d'infiltration préférentielles.

Au point de vue de l'influence des conditions d'infiltration sur la vulnérabilité des captages en milieu karstique, trois cas peuvent être distingués:

(a) *infiltration concentrée des précipitations sous forme des pertes de cours d'eau*: l'infiltration concentrée des eaux de ruissellement représente un lieu à vulnérabilité très élevée, de même que tout le bassin versant local du point d'infiltration (*figure 2a*);

(b) *infiltration à travers une couverture détritique (karst couvert)*: la vulnérabilité des zones concernées dépendra essentiellement de la perméabilité de la couverture et de son épaisseur, donc de son pouvoir filtrant (*figure 2b*). A remarquer que la perméabilité de la couverture varie en fonction de son état de saturation en eau;

(c) *infiltration des précipitations répartie sur l'ensemble d'une surface (karst nu)*: la vulnérabilité dépendra essentiellement du temps de parcours que les eaux mettront pour atteindre le réseau karstique via l'épikarst ou les blocs peu perméables (*figure 2c*).

Caractéristiques de l'épikarst

L'épikarst, également appelé zone sous-cutanée, est une zone d'absorption des eaux, située directement dans les premiers mètres au-dessous de la surface du sol recouvrant les calcaires. Cette zone est fracturée, du fait de la décompression des terrains provoquée par le relâchement des contraintes tectoniques liées à leur mise en place. Elle est par conséquent favorable au développement d'importants processus d'altération (Dodge 1982) et de karstification. L'épikarst a généralement une épaisseur de 0.5 à 2 mètres (Bonacci 1987), mais peut être plus profond (*figure 3*) et atteindre quelques 5 à 10 mètres (Doerfliger 1996a). L'épikarst constitue ainsi un aquifère perché temporaire



Figure 3. Epikarst (limite inférieure non visible) dans les calcaires du Portlandien; carrière des Breuleux. (photo N. Doerfliger)

(Mangin 1975); à travers sa limite inférieure marquée par un contraste de conductivité hydraulique, l'eau stockée peut soit percoler à travers les fissures, soit être drainée rapidement au profit de conduits verticaux (cheminées, puits naturels) (Ford & Williams 1989; Klimchouk 1995). L'eau circulant dans cette zone épikarstique possède une composante horizontale importante (écoulement des eaux par des fractures en direction des conduits verticaux) et une composante verticale plus réduite correspondant aux suintements lents dans les fissures et les écoulements dans les conduits (*figure 4*).

L'épikarst existe dans les régions de karst couvert ou nu et n'est pas nécessairement continu dans son extension latérale. Selon les hypothèses relatives à la formation des dolines, par exemple l'hypothèse des dolines de solution de Williams (1983), un épikarst peut exister sous une couverture pédologique même sans trace de morphologie marquée (*figure 5*).

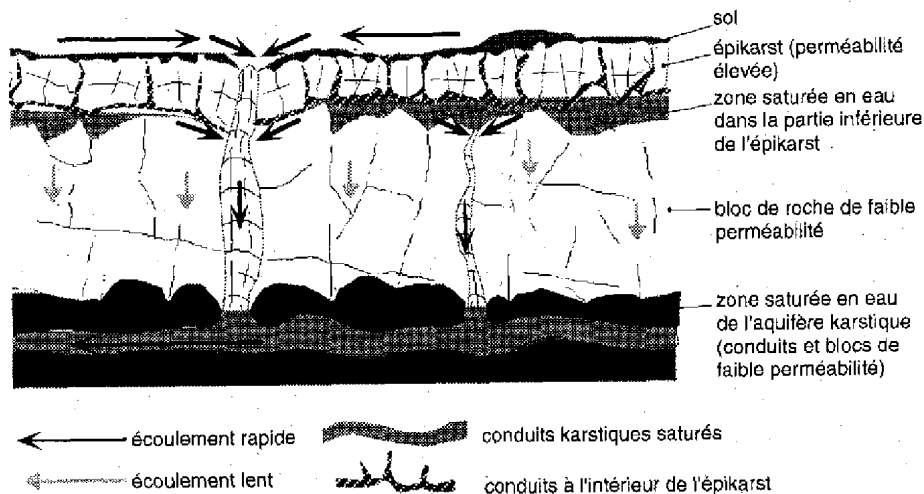
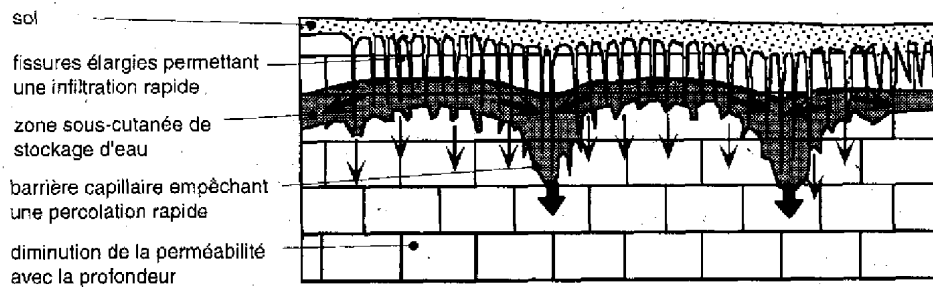


Figure 4. Représentation schématique du fonctionnement de l'épikarst (Jeannin 1996, d'après Smart & Friedrich 1986).

Informations sur le milieu

(A) Karst couvert



Informations sur l'écoulement

(B) Karst nu

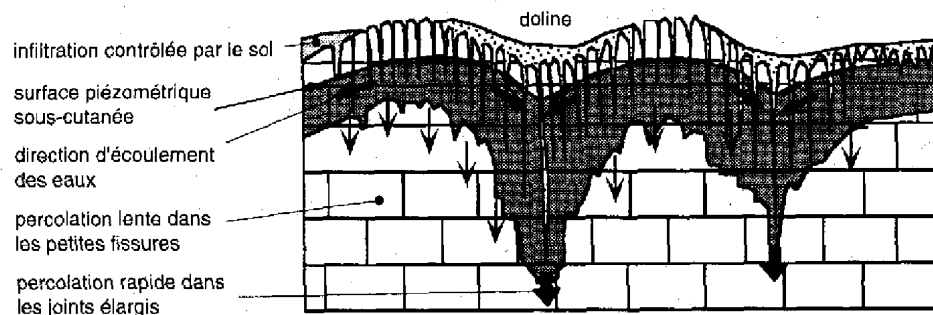


Figure 5. Stockage sous-cutané, écoulement latéral de subsurface vers des zones de bonne conductivité hydraulique et évolution vers une doline de solution (Williams 1983).

3 LA MÉTHODE MULTICRITÈRE - MÉTHODE EPIK

Principes et procédure

La nouvelle méthode proposée pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu karstique est une méthode multicritère à indices, appelée EPIK, qui prend en compte *quatre critères*: l'Épikarst, la couverture Protectrice, les conditions d'Infiltration et le développement du réseau Karstique (Doerfliger 1996a). Ces critères correspondent à quatre aspects spécifiques de l'organisation des écoulements au sein d'un aquifère karstique tels qu'ils ont été décrits plus haut. Cette méthode permet d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines des régions karstiques aux influences naturelles et anthropogènes de manière globale et rigoureuse.

Après détermination des limites du bassin d'alimentation de la source ou du captage étudié, *la méthode se déroule en trois étapes*:

(1) Évaluation semi-quantitative et cartographie de chacun des quatre critères - épikarst, couverture protectrice, conditions d'infiltration et développement du réseau karstique - en tout point du bassin d'alimentation, discrétisé en surfaces élémentaires (on utilisera de préférence une grille à maille carrée de 20 mètres de côté). Lors de cette évaluation, chaque critère est caractérisé par un indice, de 1 à 3 ou 4. L'évaluation semi-quantitative des critères E, P, I et K est effectuée à l'aide de différentes méthodes, directes ou indirectes, locales ou globales telles que les essais de traçage, la géophysique, l'étude géomorphologique, les analyses des hydrogrammes de crues, les sondages à la tarière ou à la pelle rétro, l'interprétation des photos aériennes.



(2) Calcul de la valeur du facteur de protection F, en tout point du bassin d'alimentation, par attribution d'une valeur à chaque critère indexé, pondération des critères en fonction de leur rôle protecteur et addition des valeurs obtenues pour les quatre critères. Concrètement, on superpose les quatre cartes de critères indexés pour obtenir une représentation cartographique de la répartition du facteur F pour l'ensemble du bassin d'alimentation. Cette opération peut, selon les cas, être sensiblement facilitée par l'utilisation d'un système d'information géographique. Pour le développement de la méthode EPIK, le système d'information géographique IDRISI, en version Windows pour PC, a été utilisé.



(3) Délimitation des zones de protection: grâce à une relation d'équivalence entre le facteur F et les zones de protection, on peut transformer la carte obtenue en carte de zones de protection S1, S2 et S3 de manière rigoureuse.

Lors du développement de la méthode, les valeurs, les facteurs de pondération et la relation d'équivalence des étapes 2 et 3 ci-dessus ont été ajustés et vérifiés sur 4 sites représentant des contextes géologiques différents (Jura plissé, Jura tabulaire, Préalpes médianes et Alpes helvétiques).

3.1 Evaluation des 4 critères E, P, I et K

E Epikarst

La caractérisation de l'épikarst est basée essentiellement sur l'étude des formes de surface du modelé karstique. Les considérations du chapitre précédent sur le fonctionnement de l'épikarst mettent en évidence la difficulté à caractériser des zones épikarstiques sur le plan de leur développement et de leur degré de connexion avec le réseau karstique. Il est notamment difficile, dans un contexte ne présentant pas de modelé prononcé, d'identifier sur le terrain un épikarst couvert, même avec les outils géophysiques actuels. Le critère E est évalué par 3 indices caractérisant une vulnérabilité décroissante:



Figure 6. Fracture parcourant le lapiez du massif des Sieben Hengste, Berne, Suisse. (photo V. Puech)

- *l'indice 1 (E_1)* correspond au cas le plus vulnérable. Y sont associés les gouffres et dépressions absorbant un cours d'eau (avens, embuts, ponors), les dolines, les lapiez, les reliefs ruiniformes, les cuestas et les affleurements affectés d'une fracturation intense (figure 6). Ces affleurements peuvent correspondre par exemple à des entailles du terrain le long des voies de communication (routes, chemins de fer) ou à des carrières;
- *l'indice 2 (E_2)* correspond à toutes les zones intermédiaires dans les alignements de dolines, ouvalas (coalescence de plusieurs dolines), ainsi qu'aux vallées sèches, canyons et poljés (dépressions de grande taille);
- *l'indice 3 (E_3)* s'étend au reste du bassin d'alimentation non affecté par les objets morphologiques précités.

L'évaluation de E en trois critères indexés, E_1 à E_3 , revient essentiellement à une cartographie des objets géomorphologiques. Pour effectuer une telle cartographie, les cartes topographiques aux échelles 1:5'000, 1:10'000 voire 1:25'000 fournissent la plus grande partie des informations nécessaires. Les photos aériennes peuvent également être utilisées et servir de sources complémentaires d'information. Une vérification sur le terrain lors de la cartographie des autres critères est recommandée.

Sous le terme de couverture protectrice, sont compris aussi bien le sol (terme pédologique) que les autres formations géologiques qui peuvent recouvrir l'aquifère karstique, tels que dépôts quaternaires (moraines, silt, loess, éboulis) ou autres formations pré-quaternaires non karstiques (argiles, grès, marnes) (Doerfliger 1996a).

Les paramètres pédologiques varient spatialement et ne sont pas obtenus de manière aisée à partir de cartes de sol, pour autant que celles-ci existent; en effet, la nomenclature du référentiel pédologique utilisé par les spécialistes du sol n'est pas établie en fonction des paramètres définissant le pouvoir protecteur du sol, tels que la texture, la teneur en matière organique ou encore la conductivité hydraulique.

Pour des questions notamment de coûts, il n'est pas possible de cartographier séparément ces différents paramètres dans le cadre de la délimitation des zones de protection. Ainsi, lors de l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque du bassin d'alimentation, *seule l'épaisseur de la couverture protectrice est prise en considération* (Doerfliger et Tâche 1995, Doerfliger 1996a).

Les secteurs du bassin comprenant une couverture protectrice peuvent être identifiés et séparés des secteurs dénudés en utilisant la *documentation existante* (carte géologique, monographies régionales). Les photos aériennes et les images satellites (en fonction de la résolution des images) peuvent également fournir des informations relatives à la présence ou à l'absence de sols. Elles peuvent aussi servir à définir l'épaisseur du sol, pour autant qu'il y ait un contrôle sur le terrain.

Sur le terrain, l'épaisseur du sol est directement mesurée à l'aide d'une *tarière à main* (figure 7). Si le bassin d'alimentation ne représente pas une surface trop importante, les épaisseurs de sol peuvent être déterminées selon une grille régulière. Si le bassin d'alimentation considéré est de grande surface (par ex. plus de 15 km²), les dimensions de la maille de la grille deviennent plus grandes et il est nécessaire d'appliquer un principe d'équivalence morphologique: pour un point donné, l'épaisseur mesurée est attribuée à l'ensemble des points contenus dans un carré de 100 m à 200 m de côté, s'ils sont représentatifs d'une morphologie identique. Les excavations, par exemple les fouilles pour canalisations, peuvent également donner de précieux renseignements sur l'épaisseur de la couverture.



Figure 7. Mesure de l'épaisseur du sol au moyen d'une tarière à main, Jura. (photo N. Doerfliger)

Pour l'indexation de P (*figure 8*), deux cas sont pris en compte selon la présence ou l'absence de formations géologiques de faible conductivité hydraulique directement sous le sol:

A) *Sol reposant directement sur les formations calcaires* ou sur des formations détritiques grossières très perméables (ex. éboulis, moraines latérales)

- *l'indice 1 (P_1)* correspond à une couverture de 0 - 20 cm de sol.
- *l'indice 2 (P_2)* correspond à une couverture de 20 - 100 cm de sol.
- *l'indice 3 (P_3)* correspond à une couverture de > 100 cm de sol.

B) *Sol reposant sur des formations géologiques peu perméables* (au moins 20 cm de limons lacustres, argiles, marnes)

- *l'indice 1 (P_1)* n'est pas représenté car on considère comme négligeable l'effet protecteur de formations géologiques peu perméables de moins de 20 cm d'épaisseur. On retombe alors sur le cas A.
- *l'indice 2 (P_2)* correspond à une couverture combinée de sol et de formations géologiques peu perméables de 0.2 à 1 mètre d'épaisseur au total. A épaisseur égale, on considère que l'effet protecteur d'un sol est en principe supérieur à celui d'une formation géologique peu perméable.
- *l'indice 3 (P_3)* correspond à une couverture totale de sol et de formations géologiques peu perméables de plus d'un mètre d'épaisseur. Le sol peut être absent ; toutefois, un peu de sol compense l'effet légèrement moins protecteur des formations géologiques peu perméables si celles-ci sont relativement peu épaisses.
- *l'indice 4 (P_4)* correspond à une couverture de plus de 8 m de formations géologiques peu perméables (forte composante limoneuse ou argileuse), ou à un sol de plus d'un mètre sur plus de 6 mètres de formations géologiques peu perméables. L'épaisseur des formations est à vérifier de manière ponctuelle, par exemple à l'aide de forages ou de sondages à la tarière à moteur.

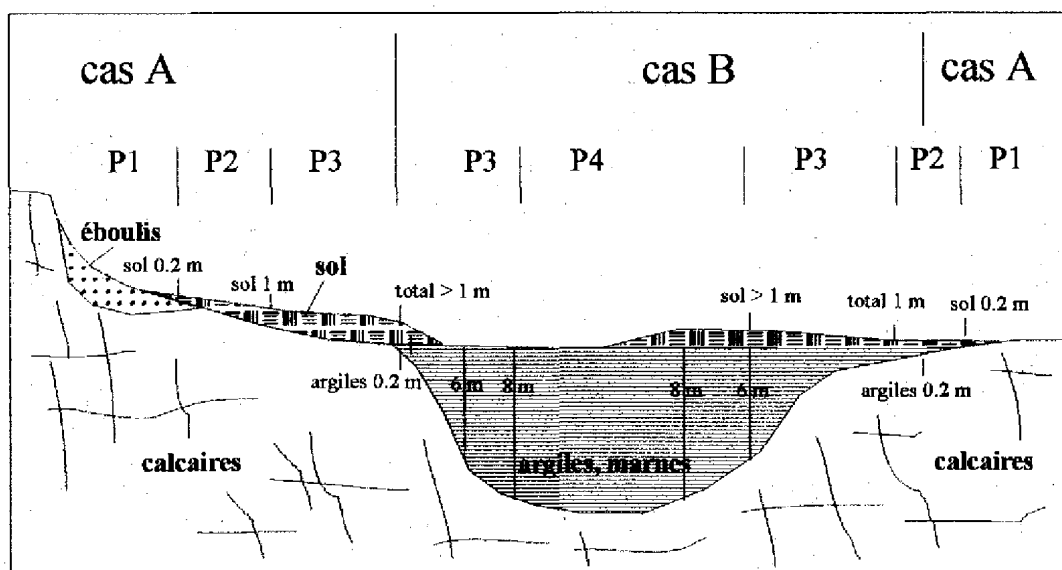


Figure 8. Illustration des différents indices de la couverture protectrice.

I Conditions d'infiltration

L'évaluation des conditions d'infiltration est basée sur l'identification des zones d'*infiltration concentrée* (pertes - *figure 9* - ou lits de cours d'eau temporaires ou pérennes, zones drainées artificiellement) et l'appréciation des surfaces d'*infiltration diffuse*. Ces dernières sont caractérisées par leur coefficient de ruissellement, qui dépend de la *pente du terrain* et de l'*occupation du sol*.

A partir d'une table de valeurs des coefficients de ruissellement en fonction de la pente et de l'occupation du sol (forêts, pâturages et champs cultivés) établie pour la Suisse (Sautier 1984), la limite entre coefficient de ruissellement faible et élevé a été fixée à 0.22 pour les pâturages et à 0.34 pour les champs cultivés (le coefficient de 0.34 est représentatif des champs cultivés avec semis dans le sens de la pente). Pour l'indexation décrite plus bas, ces valeurs ont été admises comme correspondant à des pentes respectivement de 25 % et 10 % (Doerfliger 1996a). On distingue aussi pour évaluer le critère I les surfaces situées à l'intérieur et à l'extérieur des *bassins versants des pertes et des cours d'eau*; à l'extérieur de ces bassins, les *pieds de pente* jouent un rôle de collecteur des eaux de ruissellement.

Les données nécessaires à la caractérisation des conditions d'infiltration sont obtenues par l'étude des bassins topographiques des cours d'eau alimentant des pertes, sur la base de cartes topographiques. La délimitation des pentes critiques et des zones de pieds de pentes peut s'effectuer manuellement à partir de la carte topographique. Cependant, si l'on dispose du modèle numérique d'altitude de la zone d'étude, il est plus aisé de déterminer ces zones en utilisant un système d'information géographique. Cela représente également un gain de temps non négligeable.

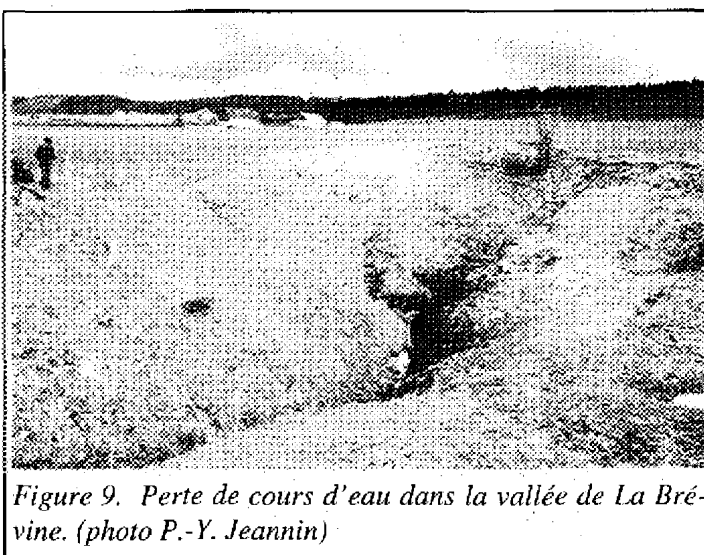


Figure 9. Perte de cours d'eau dans la vallée de La Brévine. (photo P.-Y. Jeannin)

On distingue 4 indices pour caractériser I, du plus vulnérable (I_1) au moins vulnérable (I_4) en considérant deux cas A et B, à l'intérieur et à l'extérieur du bassin versant d'un cours d'eau alimentant une perte karstique:

A) À l'intérieur du bassin versant des pertes et des cours d'eau (figure 10)

- *l'indice 1 (I_1)* correspond aux pertes pérennes et temporaires, lits et berges des cours d'eau, cours d'eau pérennes et temporaires alimentant une perte, cours d'eau infiltrants et parties du bassin versant drainées artificiellement.
- *l'indice 2 (I_2)* correspond aux parties du bassin versant de perte ou cours d'eau mentionnés sous I_1 non drainées artificiellement et avec un coefficient de ruissellement élevé, c'est-à-dire les parties dont la pente est supérieure à 10 % pour les zones de culture, supérieure à 25 % pour les prairies et pâturages.
- *l'indice 3 (I_3)* correspond aux parties du bassin versant de perte ou cours d'eau mentionnés sous I_1 non drainées artificiellement et avec un coefficient de ruissellement

faible, c'est-à-dire les parties dont la pente est inférieure à 10 % pour les zones de culture, inférieure à 25 % pour les prairies et pâturages.

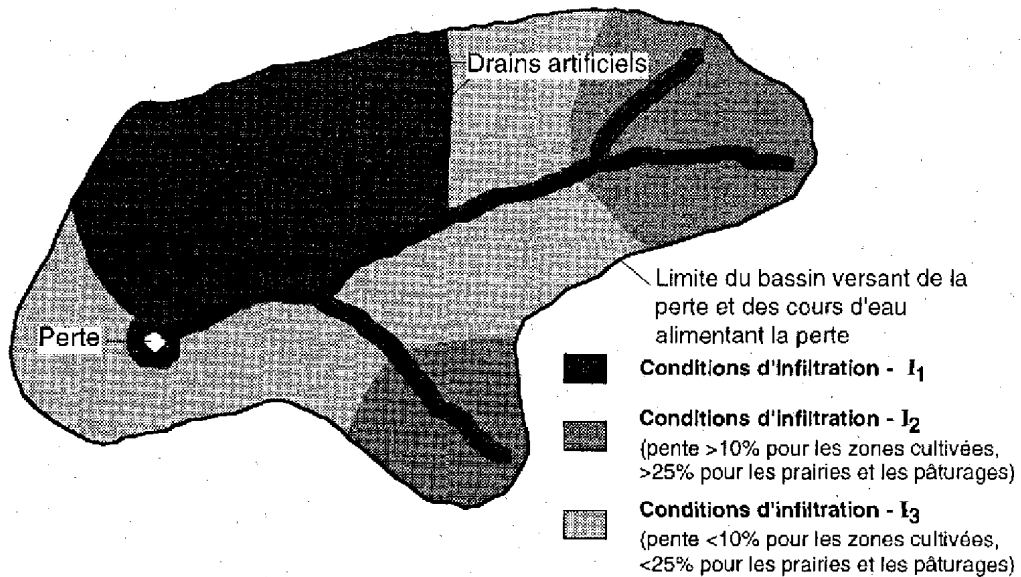


Figure 10. Conditions d'infiltration dans le bassin versant (cas A) d'une perte et des cours d'eau alimentant cette perte.

B) À l'extérieur du bassin versant des pertes et des cours d'eau (figure 11)

- **l'indice 3 (I_3)** correspond aux surfaces situées au pied d'une pente jouant le rôle de collecteurs des eaux de ruissellement et aux pentes alimentant ces points bas (pentes avec un coefficient de ruissellement élevé, c'est-à-dire supérieures à 10 % pour les zones de culture, supérieures à 25 % pour les prairies et pâturages).
- **l'indice 4 (I_4)** correspond au reste du bassin d'alimentation.

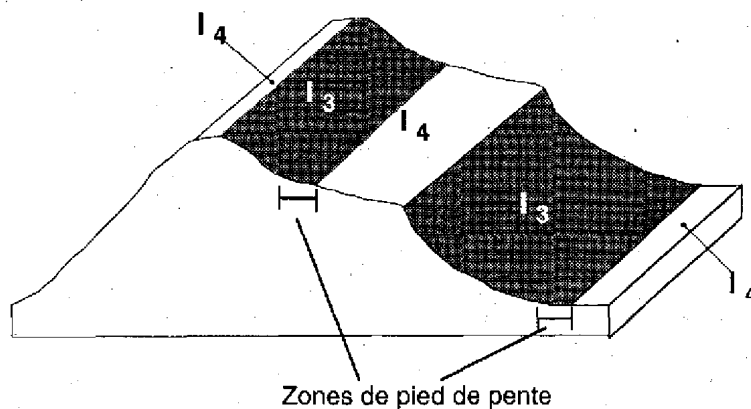


Figure 11. Conditions d'infiltration à l'extérieur du bassin versant (cas B) des pertes et des cours d'eau alimentant ces pertes (pentes faibles et fortes, pieds de pente).

La vulnérabilité est évaluée en fonction de la présence ou non d'un réseau karstique, et du degré de développement de ce réseau. Afin d'apprécier l'importance du réseau karstique par rapport au volume de la roche peu perméable environnant (fissuré ou non), nous considérons différentes indications.

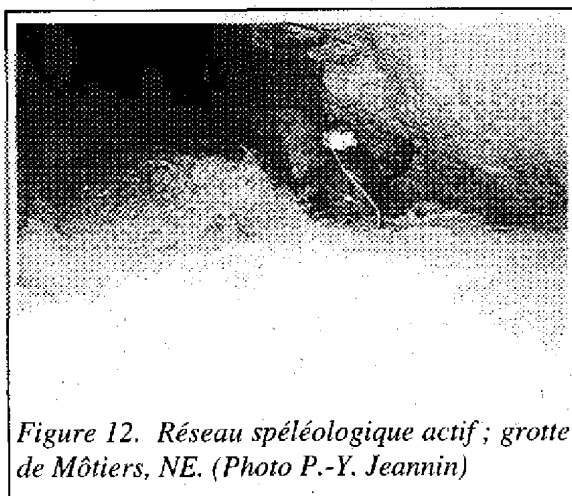


Figure 12. Réseau spéléologique actif ; grotte de Môtiers, NE. (Photo P.-Y. Jeannin)

Une première indication est l'identification directe d'éléments d'un réseau karstique, tels que grottes, puits verticaux (avens), réseau spéléologique actif (figure 12), dans le bassin d'alimentation considéré.

S'il n'y a aucune indication observable d'un réseau karstique, il faut avoir recours à des méthodes indirectes. Celles-ci se basent sur l'analyse des hydrogrammes de crue, l'interprétation des essais de traçage, et l'examen de la variabilité de la qualité de l'eau.

Les hydrogrammes de crue (figure 13) permettent d'interpréter le degré de développement de l'organisation des aquifères. Le temps de réaction de la source aux événements pluvieux estimé d'après l'hydrogramme est une indication pertinente pour caractériser le développement du réseau karstique. Si l'on peut observer une réponse rapide, un débit important (au moins deux fois

le débit de base) suivi d'une décrue rapide et d'un tarissement, on peut supposer qu'il existe un réseau karstique. Par réponse rapide, on entend par exemple une réponse dans un laps de temps de 6 à 12 heures (selon la taille du bassin d'alimentation) après un événement pluvieux d'une intensité supérieure à 15 mm. On ne peut toutefois pas appliquer cette règle si l'évapotranspiration est importante.

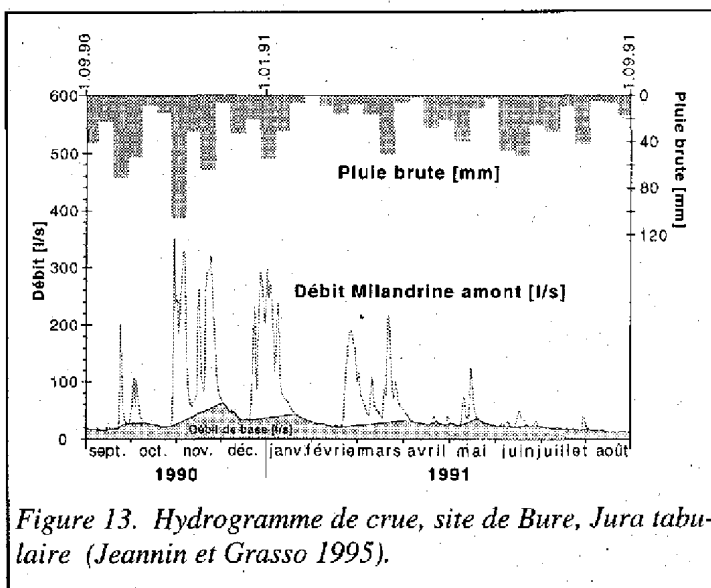


Figure 13. Hydrogramme de crue, site de Bure, Jura tabulaire (Jeannin et Grasso 1995).

La vitesse moyenne de transit calculée à partir d'un essai de traçage est une indication qui permet d'identifier la présence ou non d'un karst actif. Une vitesse supérieure à 15m/h en basses eaux à partir d'une perte, et supérieure à environ 75 m/h en hautes eaux permet d'admettre l'existence d'un réseau karstique.

Les variations de la qualité de l'eau d'une source fournissent une bonne indication de l'existence ou non d'un réseau karstique. Si la qualité de l'eau au point de vue bactériologique est stable après de fortes précipitations, le réseau karstique est supposé peu développé ou protégé par un milieu poreux et l'ensemble du système s'apparente à un système fissuré. Dans le cas contraire, un réseau karstique actif peut être admis.

Une dernière indication est fournie par le **nombre de sources** du système karstique. Un système bien développé sera caractérisé par la présence d'un exutoire unique alors qu'un réseau peu développé possèdera très souvent plusieurs sources. Ceci est basé sur l'hypothèse de l'existence d'une hiérarchisation d'un réseau karstique (Mangin 1975).

Le critère K est indexé par trois indices, du plus vulnérable au moins vulnérable:

- **l'indice 1 (K_1)** pour un réseau karstique moyennement à bien développé, à conduits décimétriques à métriques très peu colmatés et bien connectés entre eux;
- **l'indice 2 (K_2)** pour le réseau karstique mal développé (à drains ou conduits mal connectés ou colmatés, ou encore de dimension décimétrique et inférieure);
- **l'indice 3 (K_3)** pour le cas des systèmes à exutoire situé en milieu poreux pouvant jouer un rôle de filtre (effet de protection à vérifier notamment par des chroniques d'analyse de qualité d'eau) ainsi que pour les aquifères calcaires fissurés non karstifiés.

L'indice du critère K est généralement attribué globalement pour tout le bassin d'alimentation considéré; cependant il peut être différencié par régions selon le développement du réseau karstique, lorsque celui-ci peut être caractérisé de manière spécifique.

Sans information au niveau spéléologique, la distinction entre K_1 et K_2 n'est cependant pas des plus évidentes. Si l'on dispose au minimum d'un hydrogramme de crue sur un cycle annuel entier, il est possible d'appliquer la méthode de classification des aquifères karstiques de Mangin (1975). Cette méthode est basée sur le pouvoir régulateur k de l'aquifère et un paramètre d'infiltration i . Le paramètre k est défini comme le rapport entre le volume dynamique (calculé en intégrant le débit entre le début du tarissement et un temps infini) et le volume total écoulé au cours d'un cycle hydrologique moyen. Le paramètre i (voir définition **figure 14**) exprime l'importance du retard de l'arrivée des eaux d'infiltration à l'exutoire. Mangin distingue 5 classes. Les classes I, II et III peuvent être associées au critère indexé K_1 , la classe IV à K_2 et la classe V à K_3 . Il faut cependant remarquer que la classification d'un aquifère à partir de l'analyse des courbes de récession n'est pas toujours univoque: tandis que le paramètre k varie peu d'une crue à l'autre, le paramètre i dépend fortement des pluies qui ont généré la crue (Grasso & Jeannin 1994). La distinction entre K_1 et K_2 selon cette méthode ne dépend donc pas seulement du système aquifère.

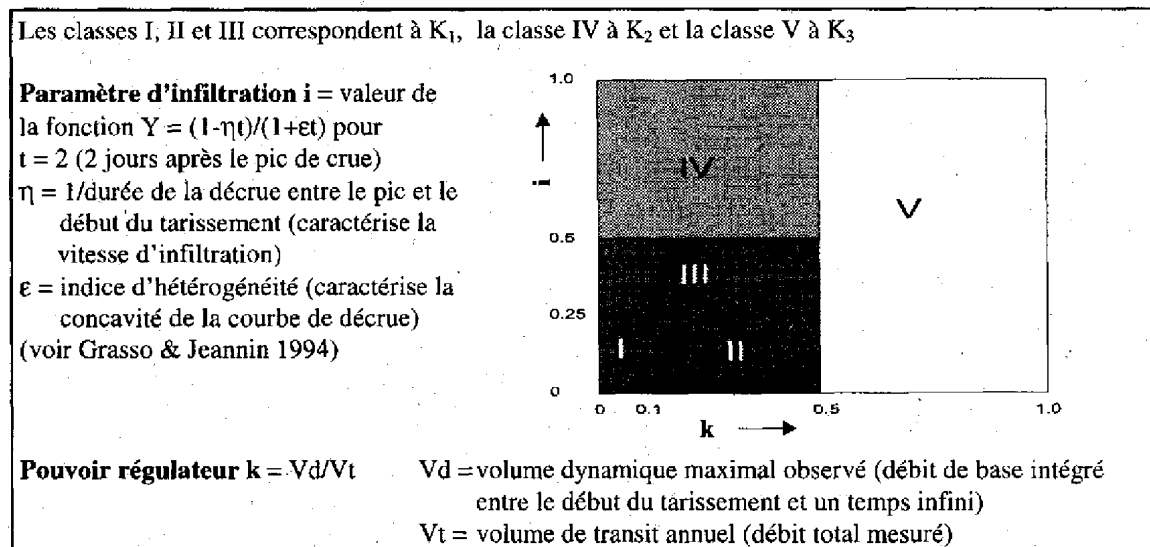


Figure 14. Classification des aquifères karstiques de Mangin (1975).

Récapitulation de l'évaluation des critères E, P, I et K

Le **tableau 1** résume les caractéristiques d'indexation des quatre critères de la méthode EPIK. L'évaluation de chaque critère est décrite succinctement.

Tableau 1. Indexation des quatre critères de la méthode EPIK.

Morphologie karstique observée (en relation avec l'épikarst) Absence de morphologie karstique	E ₁	Gouffre, aven, ponor, embut, doline, lapiez, relief ruiniforme, cuesta	
	E ₂	Zones intermédiaires situées dans les alignements de dolines ; ouvalas, vallées sèches, canyons, poljés	
	E ₃	Le reste du bassin d'alimentation	
		A. Sol reposant directement sur les formations calcaires ou sur des formations détritiques de très grande conductivité hydraulique *	B. Sol reposant sur > 20 cm de formations géologiques de faible conductivité hydraulique**
Absence de couverture protectrice	P ₁	0 - 20 cm de sol	
	P ₂	20 - 100 cm de sol	20 - 100 cm de sol et de formations de faible conductivité hydraulique
	P ₃	> 1 m de sol	> 1 m de sol et de formations de faible conductivité hydraulique
Couverture protectrice importante	P ₄	-	formations de très faible conductivité hydraulique d'épaisseur > 8m, ou d'épaisseur > 6 m avec > 1 m de sol (vérification ponctuelle nécessaire)
Infiltration concentrée	I ₁	Perte pérenne ou temporaire - lits et berges de cours d'eau pérenne ou temporaire alimentant une perte - écoulement superficiel s'infiltrant - secteurs du bassin versant d'un cours d'eau comprenant des systèmes de drainage artificiel	
	I ₂	Secteurs du bassin versant d'un cours d'eau non drainés artificiellement, et dont la pente est supérieure à 10% pour les surfaces cultivées et supérieure à 25% pour les prairies et les pâturages	
	I ₃	Secteurs du bassin versant d'un cours d'eau dont la pente est inférieure à 10% pour les zones cultivées et inférieure à 25% pour les prairies et les pâturages. En dehors du bassin versant d'un cours d'eau, zones de pieds de pentes collectant les eaux de ruissellement et pentes prononcées (supérieure à 10% pour les surfaces cultivées et supérieure à 25% pour les prairies et les pâturages) dont les eaux de ruissellement alimentent ces zones	
	I ₄	Le reste du bassin d'alimentation	
Infiltration diffuse			
Réseau karstique bien développé	K ₁	Réseau karstique bien développé, à conduits décimétriques à métriques très peu colmatés et bien connectés entre eux	
Réseau karstique mal développé	K ₂	Réseau karstique mal développé, à drains ou conduits mal connectés ou colmatés, ou encore de dimension décimétrique et inférieure	
Aquifère mixte ou fissuré	K ₃	Exutoire en milieu poreux avec un effet protecteur possible - aquifère fissuré non karstique	

*Exemples: éboulis, moraines glaciaires latérales.

**Exemples : limons, argiles.

3.2 Calcul du facteur de protection F

La combinaison des quatre critères indexés décrits précédemment permet de déterminer la valeur du facteur de protection F en tout point du bassin d'alimentation. Le calcul est effectué de la manière suivante:

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l \quad (1)$$

avec F = valeur du facteur de protection

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficient de pondération de chacun des critères

E_i, P_j, I_k, K_l : valeur de chacun des critères indexés

Attribution de valeurs aux critères indexés

Pour définir les valeurs des critères indexés dans l'équation (1), différentes considérations ont été prises en compte, par exemple:

- Une doline recouverte d'un sol épais ($E_1 + P_3$) représente une situation plus vulnérable qu'une dalle calcaire compacte surmontée d'une mince couverture pédologique ($E_3 + P_1$).
- Un cours d'eau alimentant une perte (I_1) représente une situation très vulnérable, indépendamment de la couverture protectrice.
- Une vallée sèche (E_2) représente une situation aussi vulnérable qu'une zone de pied de pente jouant le rôle de collecteur des eaux de ruissellement (I_3).

Les valeurs qui ont été retenues pour le calcul du facteur de protection sont présentées dans le **tableau 2**.

Tableau 2. Valeur des critères indexés E_i, P_j, I_k et K_l .

E_1	E_2	E_3	P_1	P_2	P_3	P_4	I_1	I_2	I_3	I_4	K_1	K_2	K_3
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Rappel: La valeur la plus basse correspond à la situation la plus vulnérable.

Coefficients de pondération

Les critères E (épikarst) et I (conditions d'infiltration) sont considérés comme les critères les plus importants; ils contribuent principalement à la valeur du facteur de protection et ont un coefficient élevé (α et $\gamma=3$).

Tableau 3. Coefficients de pondération attribués aux critères E, P, I et K.

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

Le critère P (couverture protectrice) conditionne moins fortement le facteur de protection et a un coefficient de pondération plus faible ($\beta=1$). Le critère K (développement du réseau karstique) a un poids intermédiaire ($\delta=2$). Le **tableau 3** présente les coefficients de pondération des critères E, P, I et K.

Facteur de protection






Les différentes solutions possibles de l'équation (1) fournissent des valeurs comprises entre 9 et 34 pour le facteur de protection F. Connaissant la valeur du facteur de protection F en tout point du bassin d'alimentation, il est possible de représenter ce facteur sous forme d'une carte. Une valeur élevée de F correspond à un pouvoir de protection élevé. Le **tableau 4** présente les différentes valeurs de F et les groupe en 3 figurés en fonction de leur association avec les zones de protection S1 à S3 (voir paragraphe suivant). Les situations qui ne peuvent se rencontrer sur le terrain sont mentionnées par un quatrième figuré. Elles correspondent à la combinaison $I_1 + E_1 + P_{3,4}$ (perte en doline avec forte couverture de sol).

Tableau 4. Valeurs des facteurs de protection

K ₁ =1	I ₁ =1			I ₂ =2			I ₃ =3			I ₄ =4		
	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4
P ₁ =1	9	15	18	12	18	21	15	21	24	18	24	27
P ₂ =2	10	16	19	13	19	22	16	22	25	19	25	28
P ₃ =3		17	20	14	20	23	17	23	26	20	26	29
P ₄ =4		18	21	15	21	24	18	24	27	21	27	30

K ₁ =2	I ₁ =1			I ₂ =2			I ₃ =3			I ₄ =4		
	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4
P ₁ =1	11	17	20	14	20	23	17	23	26	20	26	29
P ₂ =2	12	18	21	15	21	24	18	24	27	21	27	30
P ₃ =3		19	22	16	22	25	19	25	28	22	28	31
P ₄ =4		20	23	17	23	26	20	26	29	23	29	32

K ₁ =3	I ₁ =1			I ₂ =2			I ₃ =3			I ₄ =4		
	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4
P ₁ =1	13	19	22	16	22	25	19	25	28	22	28	31
P ₂ =2	14	20	23	17	23	26	20	26	29	23	29	32
P ₃ =3		21	24	18	24	27	21	27	30	24	30	33
P ₄ =4		22	25	19	25	28	22	28	31	25	31	34

	situation inexistante sur le terrain
	facteur de protection correspondant à la zone de protection S1
	facteur de protection correspondant à la zone de protection S2
	facteur de protection correspondant à la zone de protection S3
	conditions correspondant au reste du bassin d'alimentation

Les combinaisons de P_4 et E_1 sont rares ou difficiles à détecter. Celles de E_1 et I_4 (lapiez, cuesta, etc. hors du bassin d'alimentation de perte ou ruisseau) sont peu fréquentes (elles représentent néanmoins 10 % du territoire cartographié dans l'exemple de La Lenk, chapitre 4.2). Les combinaisons les plus courantes sont celles de E_3 ou E_2 avec I_4 , I_3 ou I_2 . Sur le site de La Lenk (chapitre 4.2), les combinaisons de E_3 avec P_1 ou P_3 et I_2 ou I_4 représentent 82 % du territoire cartographié. Sur celui de St-Imier (voir chapitre 4.1), les combinaisons de E_2 ou E_3 avec I_3 ou I_4 et P_2 ou P_3 représentent la très grande majorité du territoire cartographié.

3.3 Délimitation des zones de protection

La relation d'équivalence entre le facteur F et les zones de protection a fait l'objet d'un examen approfondi lors du développement de la méthode et lors de l'étude des sites tests mentionnés auparavant.

Les réflexions qui ont conduit au principe d'équivalence entre le facteur de protection F et les zones de protection S sont pour l'essentiel les suivantes:

- Les pertes, et le cas échéant les cours d'eau alimentant ces pertes (I_1) doivent être classés en $S1$.
- Les dolines, les lapiez et les cuestas (E_1) doivent être cartographiés en règle générale en $S1$, mais en $S2$ en présence d'une forte couverture et en dehors du bassin d'alimentation de pertes.
- Les secteurs classés en E_2 et I_3 doivent être attribués de préférence à la zone de protection $S2$.
- Les vallées sèches doivent, en principe, être classées en zone $S2$.
- Les secteurs dont le facteur de protection est supérieur à 25 devraient être classés en zone $S3$.
- Les secteurs dont le facteur de protection est supérieur à 25 et qui présentent une couverture protectrice importante (P_4 , à vérifier à l'aide de méthodes d'investigation appropriées) doivent être classés en dehors des zones S ("*reste du bassin d'alimentation*"), pour autant qu'ils représentent une surface significative.

Lors du développement de la méthode, l'application et la comparaison de ces critères sur différents exemples a montré que les valeurs limites du facteur de protection F se situaient à environ 20 pour la zone $S1$ (F de 9 à 19 pour un réseau karstique bien développé - K_1 , et de 11 à 21 pour un réseau karstique mal développé - K_2) et environ 25 pour la zone $S2$ (F de 20 à 24 pour K_1 et de 22 à 26 pour K_2). Les valeurs de F pour $S3$ se situaient entre 26 et 31, et celles pour le *reste du bassin d'alimentation* entre 26 et 34 (avec en plus la présence des critères indexés P_4 et $I_{3,4}$).

Pour une définition rigoureuse de la méthode, on a fixé la relation d'équivalence telle qu'elle est présentée dans le *tableau 5*. Ce tableau présente aussi une classification des termes de vulnérabilité (de très élevée à faible).

Tableau 5. Equivalence entre facteur de protection F et zones de protection S.

Vulnérabilité	Facteur de protection F	Zone de protection
très élevée	F entre 9 et 19	S1
élevée	F entre 20 et 25	S2
moyenne	F supérieur à 25	S3
faible	F supérieur à 25 et présence des critères indexés $P_4+(I_{3,d})$	reste du bassin d'alimentation

3.4 Ajustement et vérification de la méthode

Les valeurs des critères indexés et des coefficients de pondération, ainsi que les valeurs limites du facteur de protection pour l'équivalence avec les zones de protection, ont été établies de manière expérimentale, après un certain nombre d'itérations et de tests de sensibilité, pour les sites étudiés dans le cadre du développement de la méthode (Tâche et al. 1996). Ces sites (figure 15) sont situés dans le Jura plissé (St-Imier), le Jura tabulaire (Bure), les Préalpes médianes (St-Gingolph) et les Alpes helvétiques (La Lenk).

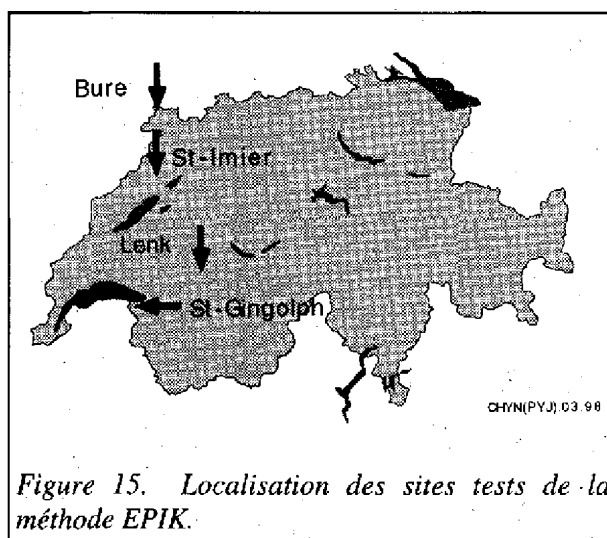


Figure 15. Localisation des sites tests de la méthode EPIK.

Les résultats ont été contrôlés sur les différents sites mentionnés, en partie au moyen d'essais de traçage et d'investigations géophysiques détaillées sur des surfaces de vulnérabilité faible à très élevée. Ces contrôles avaient pour but de vérifier aussi bien les valeurs choisies pour les critères indexés et le système de pondération que les valeurs limites choisies pour l'équivalence entre degré de vulnérabilité et zones de protection. Les résultats de ces investigations ont montré que les valeurs proposées sont cohérentes et judicieuses. **Ce sont des constantes applicables de manière générale pour les conditions rencontrées en Suisse dans le Jura, les Préalpes et les Alpes calcaires.**

Dans la pratique de la méthode, il ne semble pas nécessaire de procéder systématiquement, pour chaque site étudié, à une vérification de l'évaluation de la vulnérabilité à l'aide de méthodes d'investigation complémentaires telles que géophysique ou essais de traçage. Cependant, si la valeur du facteur de protection ne semble pas appropriée à une situation géologique et hydrogéologique donnée, le géologue-hydrogéologue pourra justifier des investigations de vérification, par exemple au moyen d'essais de traçage par hautes et basses eaux sur un secteur donné.

4 EXEMPLES D'APPLICATION: 2 CAS D'ÉTUDE

Les résultats de la cartographie de la vulnérabilité à l'aide de la méthode EPIK sur deux sites, l'un dans le Jura plissé (St-Imier / BE) et l'autre dans les Alpes du domaine helvétique (La Lenk / BE), sont présentés comme exemples d'application.

Ces exemples ont montré la faisabilité d'une telle méthode pour délimiter les zones de protection en milieu karstique. Ils donnent une idée de la répartition géographique des différents critères indexés, des zones de vulnérabilité et des zones de protection résultantes. Ils illustrent également les méthodes de caractérisation utilisées ainsi que les problèmes qui peuvent se présenter. L'investissement en temps de travail, sur le terrain et au bureau, est également discuté.

4.1 Exemple du bassin des sources de St-Imier

Introduction

Les sources de la Raisetete, de la Grande Dou, de la Petite Dou et du Torrent sont situées dans le vallon de St-Imier (Jura bernois), sur le territoire de la commune de Cormoret. La source de la Grande Dou n'est pas captée. Les trois autres sont captées pour différents réseaux d'eau publics dont celui de la Commune de St-Imier.

Le bassin d'alimentation des quatre sources est situé dans les cantons de Berne et de Neuchâtel. Sa superficie est d'environ 120 km². Seule la partie située dans le canton de Berne a été prise en compte pour la présente étude, soit quelque 70 km².

Du point de vue géologique, ce bassin appartient au Jura plissé (*figure 16*). L'aquifère, d'une épaisseur de 200 à 400 mètres, est constitué par les calcaires fissurés et karstifiés du Malm (du Séquanien au Portlandien). Il est limité à sa base par la formation marneuse de l'Argovien (Malm inférieur). Du point de vue structural, le bassin d'alimentation des sources est constitué par le flanc nord de l'anticlinal du Gurnigél - Chasseral et le flanc sud de l'anticlinal Montagne du Droit - Mont-Soleil - Mont-Crosin. Ces deux anticlinaux ont une direction générale sud-ouest nord-est.

Les sources de la Raisetete, de la Grande et Petite Dou et du Torrent sont des sources de débordement situées entre 720 et 750 m d'altitude (Jäckli AG & OEHE 1981). L'eau subartésienne sourd aux points bas, là où affleurent les calcaires du Malm.

Des zones de protection ont été établies dans les années 1980 pour la partie nord du bassin d'alimentation uniquement (Schindler 1988). Elles ont été délimitées d'après les instructions pratiques en vigueur (OFPE 1982). La zone S3 couvre la quasi-totalité du territoire pris en considération. Seules deux aires d'environ 0.04 km² autour des sources correspondent aux zones S2 et S1. Malgré l'établissement de ces zones de protection, des problèmes de pollution d'origine agricole (épandage de purin) apparaissent en moyenne quatre fois par année au moment de la fonte des neiges ou lors de violents orages d'été.

Afin de tenter de remédier à cette situation, la méthode EPIK a été appliquée à ce site. Il s'agissait de délimiter de manière rigoureuse des zones de protection de dimension réaliste et compatibles avec l'usage d'un règlement d'application.

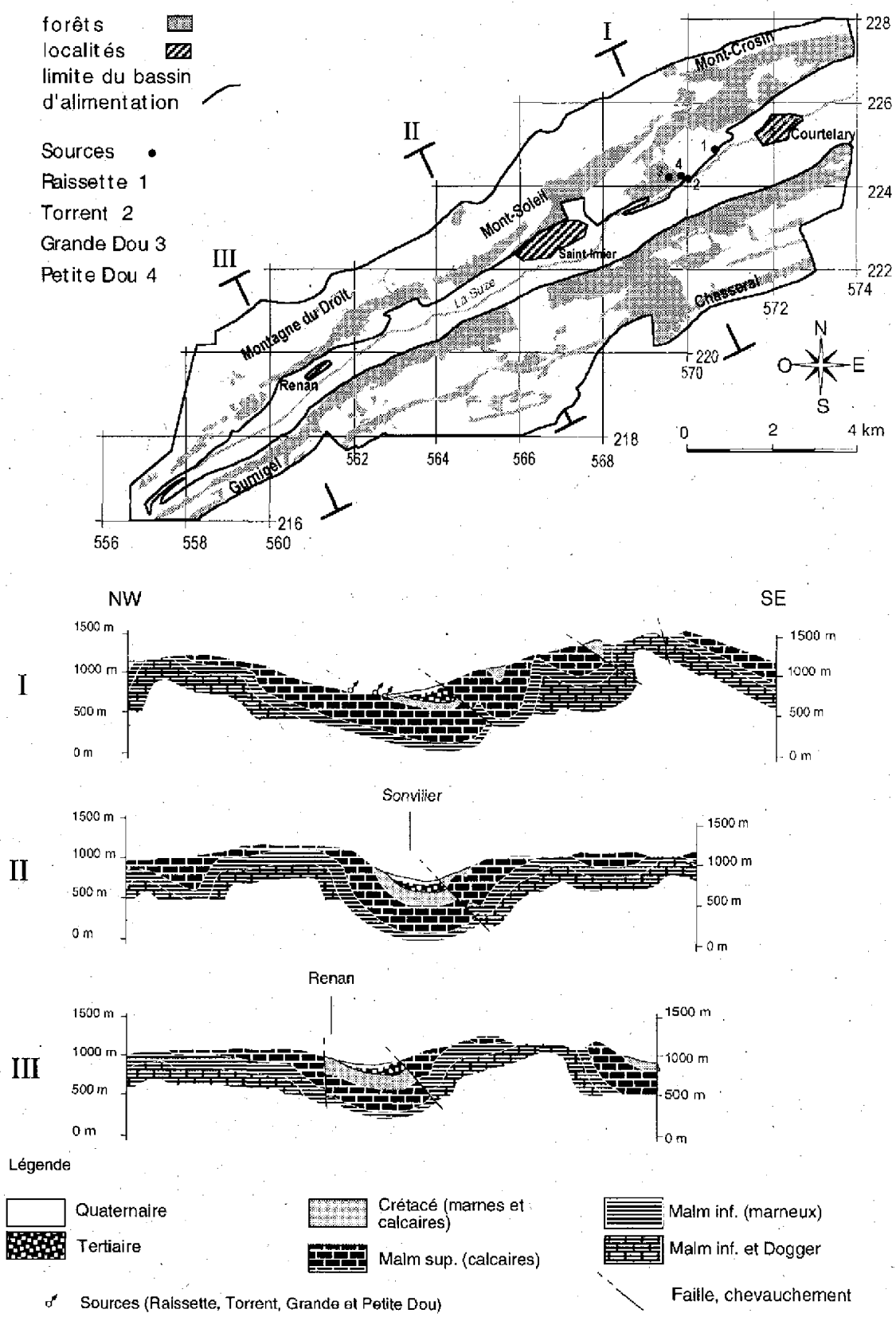


Figure 16. Situation géographique et coupes géologiques du bassin d'alimentation des sources de St-Imier (BE).

Les limites du bassin d'alimentation ont été définies, en collaboration avec le bureau Geotest AG de Zollikofen, sur la base de toute une série d'informations relatives aux essais de traçage, ainsi que des rapports existants sur l'hydrogéologie régionale et les délimitations des zones de protection (Jäckli AG & OEHE 1981, Schindler 1988). Le fond de la vallée (*figure 17*), essentiellement constitué de Tertiaire et de Quaternaire, ne fait pas partie du bassin d'alimentation.

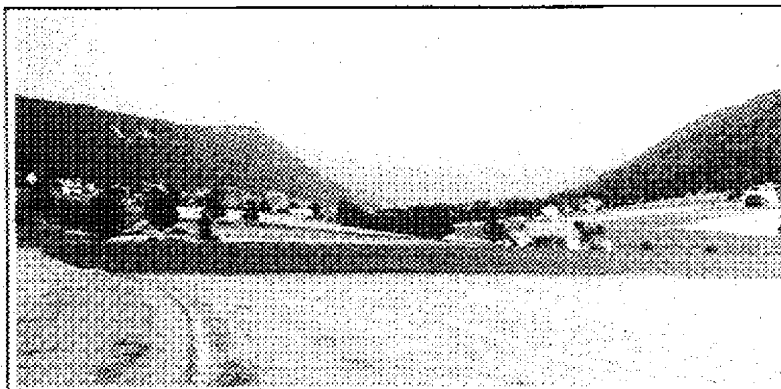


Figure 17.
 Vue de la partie amont du Vallon de St-Imier en direction du nord-est. On aperçoit de part et d'autre du vallon les anticlinaux boisés de la Montagne du Droit et du Gurnigel.
 (photo F. Pasquier)

Dans le cas de St-Imier, il avait été décidé, dès le départ, de classer toutes les forêts en zone S2, ceci afin d'éviter les dépôts permanents de bois et l'utilisation concentrée de pesticides. Ainsi les surfaces forestières ne firent pas fait l'objet d'une cartographie de la vulnérabilité. Par la suite, la classification des forêts fut changée de S2 en S3, vu que les propriétaires des forêts prouvèrent qu'ils n'avaient pas besoin de dépôts permanents et que le danger de pollution des eaux souterraines par des pesticides était donc minime.

Evaluation des critères E, P, I et K

E - épikarst (*annexe 1*)

Pour le bassin d'alimentation des sources de St-Imier, l'évaluation de la présence et du développement de l'épikarst a été menée sans moyens d'investigation trop importants ni coûteux, principalement à l'aide d'observations de terrain (modèle karstique, affleurements), d'études géomorphologiques et de l'examen de photos aériennes. La carte, élaborée à la main, a été scannée et discrétisée selon une maille de 10 mètres. La même taille de maille a été utilisée pour la discrétisation des critères P et I.

P - couverture protectrice (*annexe 2*)

Dans la région étudiée, la couverture protectrice est constituée essentiellement de sol. On n'a observé que très peu de formations quaternaires de type détritique. L'évaluation du critère P est basée principalement sur l'épaisseur des sols, déterminée à l'aide d'une tarière manuelle (quelque 100 trous). Bien que la méthode EPIK préconise la limite entre P₂ et P₃ à une épaisseur de sol de 1 m, cette limite avait été fixée à 0.5 m pour cet exemple, réalisé alors que la méthode était en développement.

I - conditions d'infiltration (*annexe 3*)

Ce critère a été évalué à l'aide du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et des cartes topographiques. L'ensemble du bassin d'alimentation, hormis les forêts, a été assimilé à des prairies et pâturages, ce qui reflète largement la situation réelle. Par conséquent, la pente limite de 25 % a été utilisée pour l'indexation de I.

Le bassin versant topographique des pertes et des cours d'eau alimentant ces pertes a été déterminé sur le système d'information géographique (SIG) à l'aide du MNA, avec une

maille de 50 m. Il ne faut donc pas accorder une précision exagérée aux cartes résultantes, même si elles reproduisent une maille de 10 m, liée pour des raisons pratiques aux fichiers du SIG. Les résultats obtenus ont été confrontés aux cartes topographiques, notamment en ce qui concerne les zones de pieds de pente: certains points, aberrants, ont dû être supprimés. On en conclut qu'il est dangereux de créer automatiquement et sans vérification, à l'aide d'un MNA, une carte des conditions d'infiltration.

K - développement du réseau karstique

Faute de données détaillées concernant les débits et la pluviométrie, il était impossible d'effectuer une étude précise des corrélations pluie/débit pour les sources considérées. La méthode de classification des aquifères karstiques de Mangin n'a donc pas pu être appliquée. On n'a pas observé de manifestations directes du réseau karstique (grottes, gouffres). On ne disposait pas non plus d'études géophysiques ou de données de forage. Aucune chronique de longue durée sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau des sources de la Raisetette et du Torrent n'était disponible.

Le critère K a donc été évalué globalement, pour la totalité du bassin d'alimentation, et n'a pas fait l'objet d'une cartographie. L'étude des hydrogrammes et l'analyse des essais de traçage ont mis en évidence le caractère karstique des écoulements souterrains.

L'étude des hydrogrammes a été effectuée pour la source de la Raisetette. Elle a montré que la réaction de cette source aux précipitations donne lieu à des pics de crue très pointus, dont la durée n'excède pas 24 heures. La durée de la période de décrue peut, quant à elle, excéder 24 heures. Cette source est donc bien caractérisée par un régime karstique.

Les **analyses chimiques et bactériologiques** de l'eau de la source de la Raisetette ne sont pas assez nombreuses pour que l'on puisse en tirer des renseignements sur le développement du réseau karstique (prélèvements mensuels effectués indépendamment des conditions hydrologiques).

Dans le cas des sources du Torrent, de la Grande Dou et de la Petite Dou, les seuls éléments donnant des renseignements sur le caractère karstique et le degré de développement du réseau karstique sont les essais de traçage et l'analyse des débits et de la qualité de l'eau.

Quelques 18 **essais de traçage** ont été effectués dans l'aire d'alimentation des sources de St-Imier entre 1967 et 1994. Outre le fait qu'ils ont permis la délimitation du bassin versant, certains d'entre eux donnent des renseignements importants sur le caractère karstique des écoulements. Bien que les conditions hydrologiques au moment des essais de coloration soient parfois inconnues ou connues de manière fragmentaire, il est possible de faire les remarques suivantes:

- les vitesses maximales de déplacement des traceurs, comprises entre 17 et 76 m/h en basses à moyennes eaux, sont élevées.
- le pic prononcé des courbes de restitution (pas toujours présentes ou complètes dans les rapports) montre que la majeure partie des écoulements se fait probablement par des drains karstiques. Les courbes de restitution de l'essai de traçage effectué le 23.7.1985 (Gretillat 1986) aux Combes (région des Convers) illustre particulièrement bien cela.

L'analyse des essais de traçage (sources de La Dou et du Torrent) et les analyses de débits et d'hydrogrammes (source de la Raisetette) confirment le caractère karstique des écoulements souterrains vers les sources de St-Imier. **En conséquence, la totalité du bassin d'alimentation de ces sources a été caractérisée par le critère indexé K₁.**

Facteur de protection

Le facteur de protection obtenu par la méthode décrite au paragraphe 3.2 est représenté sur la carte de vulnérabilité de la *figure 18*. Pour une meilleure lisibilité, un détail est présenté à la *figure 19*. Il ressort de ces figures que les pertes sont les points de plus grande vulnérabilité, avec une valeur du facteur de protection F de 9 sur un maximum de 29. Les lapiez situés en forêt (rappelons qu'en forêt seules les zones traversées par une route cantonale ont été levées) présentent également une vulnérabilité très élevée (F = 15), et les dolines une vulnérabilité très élevée à élevée (F = 16 à 20). Les vallées sèches présentent quant à elles une vulnérabilité élevée à moyenne (F = 21 à 26), se situant dans la même fourchette que les zones de pieds de pente. Les vallées sèches et les pieds de pente sont systématiquement moins vulnérables que les dolines et les lapiez. Les valeurs élevées du facteur de protection (F = 26 à 29) correspondent aux secteurs cumulant les indices de vulnérabilité moyenne (en l'absence du critère indexé P₄, on ne peut parler d'une vulnérabilité faible).

Zones de protection

A partir de la carte de vulnérabilité (figures 18 et 19), les zones de protection ont été définies grâce à la relation d'équivalence figurant au tableau 5. Elles sont présentées sur les *figures 20* (un détail) *et 21*. Il en ressort que les pertes et les cours d'eau alimentant ces pertes (facteur de protection F de 9 à 18), ainsi que les dolines, les lapiez et les cuestas (F entre 13 et 19) sont classés en grande majorité en S1. Les dolines avec une forte couverture de sol (P₃) à l'extérieur du bassin versant d'une perte ou d'un ruisseau (I₄) se retrouvent en zone S2. Les secteurs classés en E₂ et/ou I₃ correspondent pour l'essentiel à la zone de protection S2. Quant aux secteurs peu vulnérables comportant généralement une bonne couverture protectrice, situés hors des zones d'infiltration concentrée ou à morphologie karstique marquée, ils se retrouvent logiquement en S3. Vu l'absence de secteur classé en P₄ (plus de 8 mètres de formations de faible perméabilité) dans le bassin d'alimentation, la zone S3 s'étend jusqu'à la limite de celui-ci.

La zone S1 représente 1% de la surface cartographiée du bassin d'alimentation (partie bernoise, 67 km²). La zone S2, hormis les surfaces de forêts (32 %, non cartographiées par la méthode EPIK, voir page 34), en occupe quelque 18 %, et la zone S3, 49 %.

Conclusions

La cartographie des quatre critères indexés a permis d'obtenir la *carte de vulnérabilité* présentée à la figure 18. Le facteur de protection F varie entre les valeurs de 9 et de 29. Grâce à la relation d'équivalence figurant au tableau 5, une nouvelle *délimitation des zones S1, S2 et S3* a pu être établie. Elle est représentée sur la figure 21. Par rapport aux zones de protection existantes, les zones de protection S1 et S2 obtenues à l'aide de la méthode EPIK sont nettement plus nombreuses et réparties dans tout le bassin. Elles sont cependant limitées aux endroits sensibles. Elles devraient permettre la mise en oeuvre de limitations efficaces pour la protection des eaux souterraines, qui tiennent compte des conditions hydrogéologiques de manière différenciée et qui ne compromettent pas de manière inutile l'utilisation du territoire.

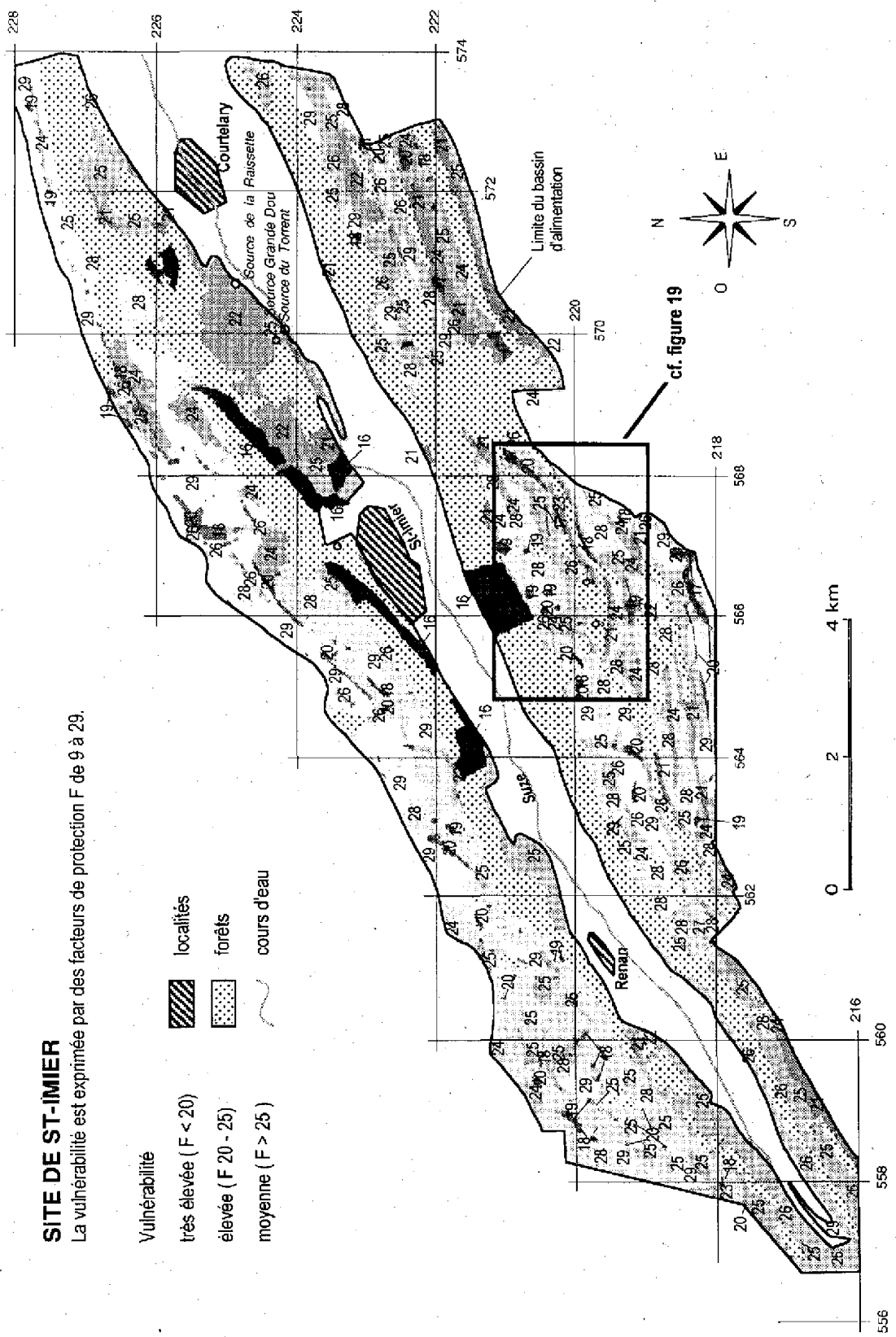


Figure 18. Carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation des sources de St-Imier (BE) - partie bernoise du bassin d'alimentation. Les trames sont noir à gris très foncé pour $F < 20$, gris foncé à moyen pour $F = 20 - 25$, et gris clair à blanc pour $F > 25$.

SITE DE ST-IMIER
 Détail de la carte de vulnérabilité

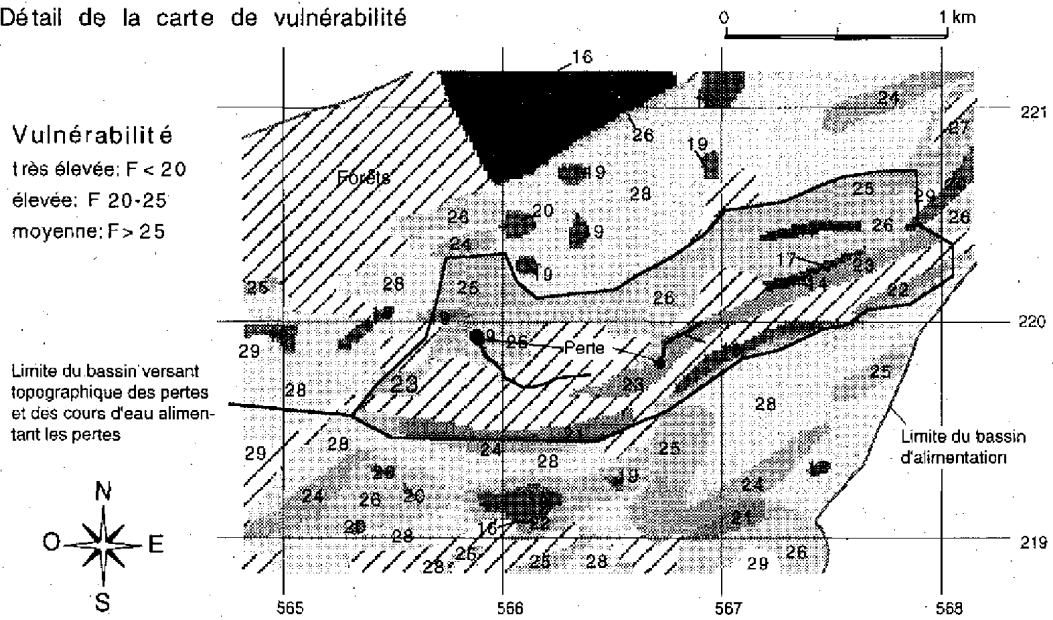


Figure 19. Un détail de la carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation des sources de St-Imier (BE). Les trames sont noir à gris très foncé pour $F < 20$, gris foncé à moyen pour $F = 20-25$, et gris clair à blanc pour $F > 25$.

SITE DE ST-IMIER
 Détail de la carte des zones de protection S

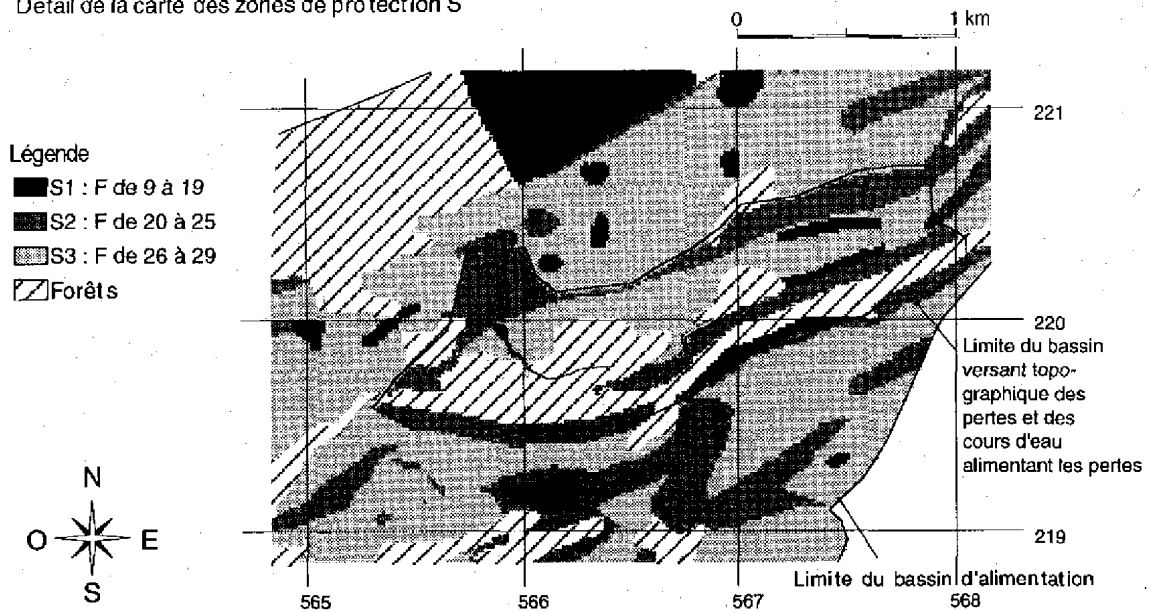







Figure 20. Un détail de la carte des zones de protection du bassin d'alimentation des sources de St-Imier (BE).

SITE DE ST-IMIER
Carte des zones de protection S

- Légende
- | | | | |
|---|----|---|-----------|
|  | S1 |  | localités |
|  | S2 |  | forêts |
|  | S3 | | |

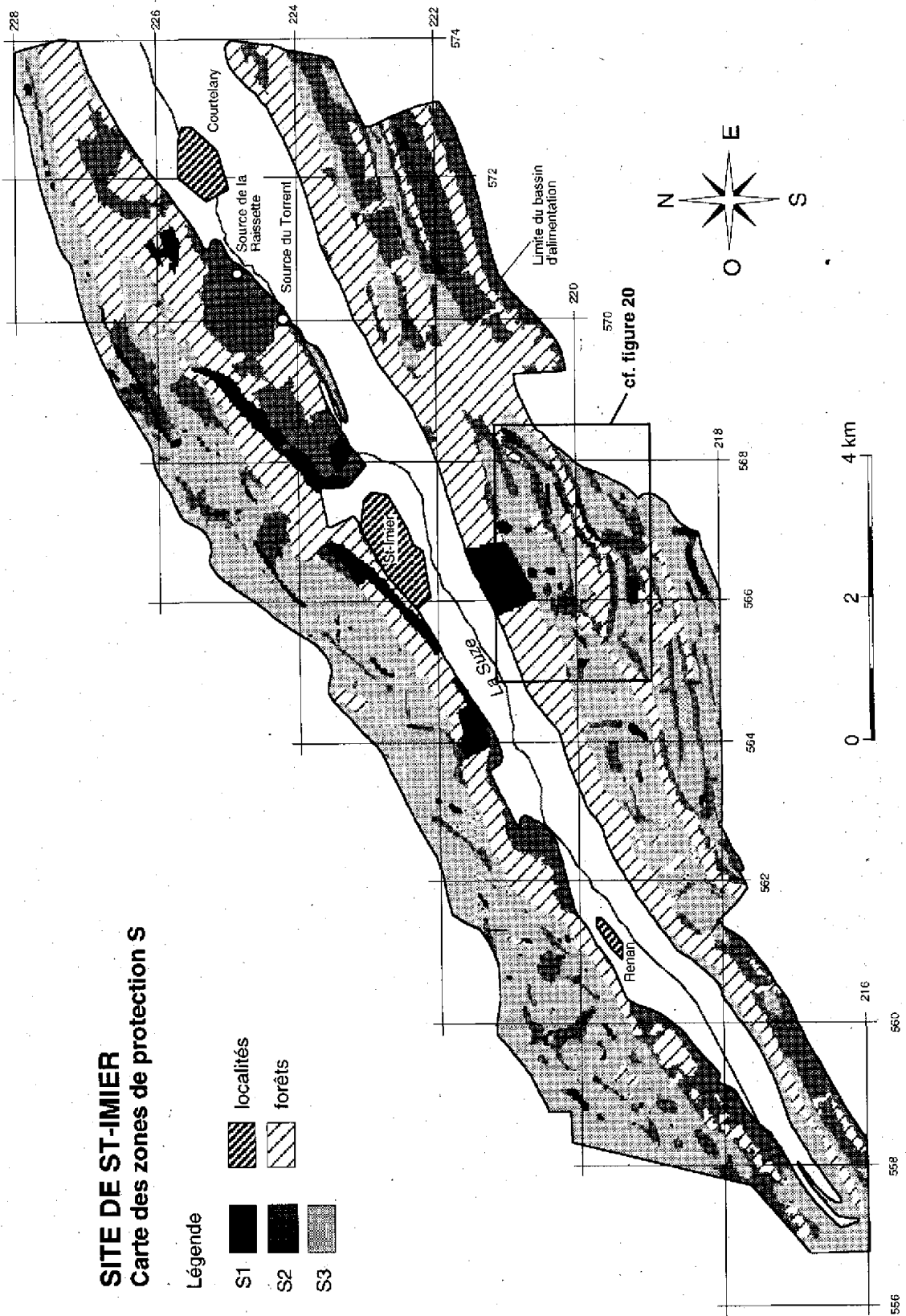


Figure 21. Carte des zones de protection du bassin d'alimentation des sources de St-Imier (BE) - partie bernoise du bassin d'alimentation.

4.2 Exemple du bassin des sources de Blatti - La Lenk

Introduction

Les sources de Blatti (ancienne et nouvelle, coordonnées 599'935/141.240) servent à l'approvisionnement en eau de la commune de La Lenk (canton de Berne). L'ancienne source (émergence naturelle) a été utilisée jusqu'en 1963. La nouvelle source, 10 m plus bas, a été captée pour garantir un débit suffisant. Le bassin d'alimentation de ces sources est situé dans les Alpes helvétiques, à une altitude comprise entre 1200 et 3200 mètres. Un secteur typique de ce bassin a été analysé et est présenté ici à titre d'exemple. Il s'agit du secteur amont, soit la région située entre le flanc nord du Mittaghorn et le Niesenhorn, de part et d'autre du lac d'Iffigen (*figures 22 et 23*).

Du point de vue géologique, le bassin d'alimentation comprend des formations de la nappe helvétique du Wildhorn, formée d'une série de plis d'orientation WSW-ENE (Wildberger 1981). La partie frontale de la nappe helvétique est enveloppée de diverticules ultra-helvétiques donnant lieu ainsi à des fenêtres tectoniques, comme celle de Schwand.

Des formations allant du Malm (calcaires de Quinten) au Paléogène (schistes à Globigérines) constituent la nappe helvétique du Wildhorn dans la région étudiée. Les écoulements karstiques se développent essentiellement dans les calcaires du Schrattekalk (Urgonien), et selon la direction des axes synclinaux. Les calcaires du Néocomien (Valanginien - Hauterivien) et du Paléogène (Série du Hohgant, grès et calcaires nummulitiques), ainsi que les calcaires marneux des Couches du Drusberg, sont également karstifiés, mais dans une moindre mesure. Les Schistes à Globigérines et les roches de l'Ultraschiste (flysch) ne sont pas ou que très ponctuellement karstifiées (Wildberger 1984).

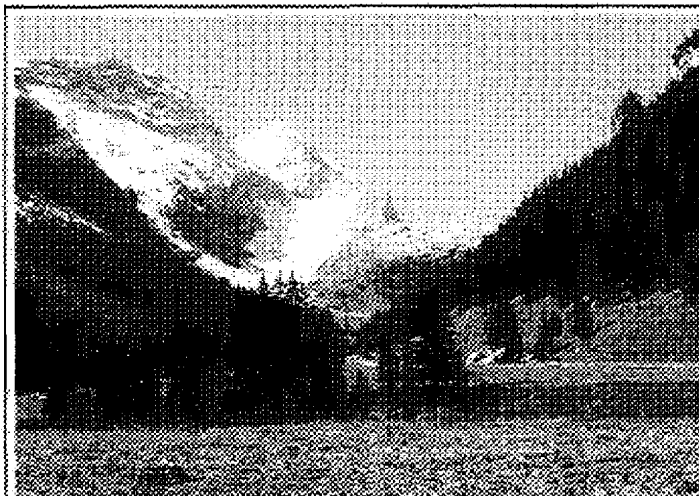


Figure 22. Vallée de l'Iffigbach, vue d'Iffigläger vers le sud-ouest; au fond, le Schnidehorn entre les pentes du Mittaghorn et du Hohberg. (photo A. Wildberger)

La thèse de Wildberger (1981) sur l'hydrogéologie karstique de la région du Rawil ainsi que des données de fouilles effectuées pour la délimitation des zones de protection des sources de Blatti (Kellerhals + Haefeli AG 1988) dans la zone de la fenêtre tectonique de Schwand (anticlinal), ont fourni des informations fort utiles pour la caractérisation des différents critères de la vulnérabilité.

Dans le cadre de l'évaluation des critères E, P, I et K, les différentes formations géologiques n'ont pas été différen-

ciées; l'ensemble des formations affleurantes de la nappe du Wildhorn (des calcaires hauteriviens à la Série du Hohgant) a été considéré de manière globale.

La feuille La Lenk de l'Atlas géologique de la Suisse au 1:25'000 (Badoux et al. 1962) et la notice explicative correspondante (Badoux & Lombard 1962), ainsi que la carte hydrogéologique de la région du Rawil (Wildberger 1981), ont servi de documents de base pour cette étude. Le lever sur le terrain, pour l'évaluation des critères E, P et I, a été effectué sur un fond topographique au 1:10'000.

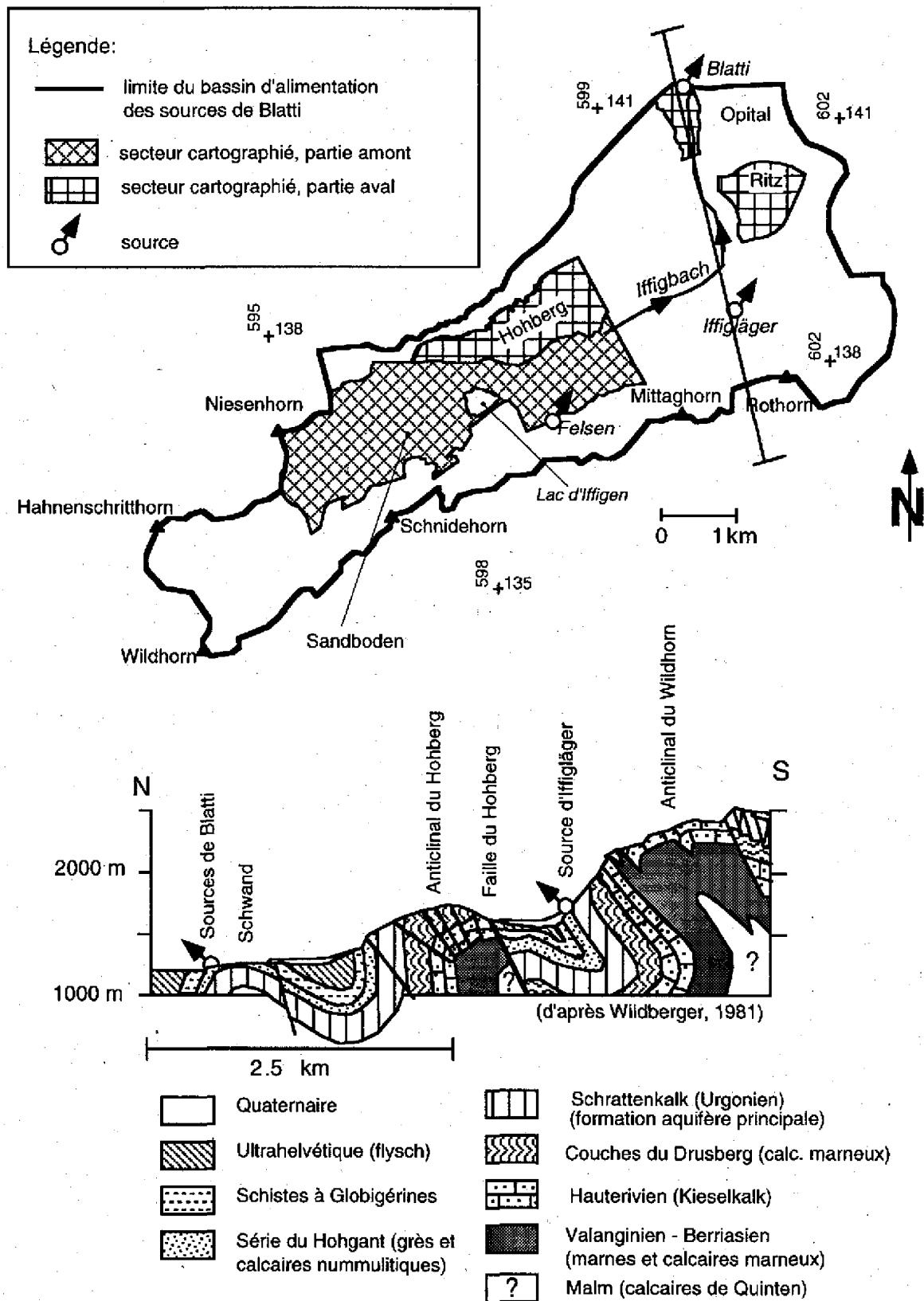


Figure 23. Situation géographique et profil géologique du bassin d'alimentation des sources de Blatti (La Lenk / BE).

E - épikarst (annexe 4)

Pour le bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, ce critère a été évalué à partir des observations des photos aériennes, de l'étude de la carte topographique au 1:10'000 et du contrôle sur le terrain.

Les affleurements de calcaire montrant des marques de karstification (lapiez, fractures élargies), ainsi que le lac d'Iffigen (*figure 24*), ont été caractérisés par le critère indexé E₁. Le critère indexé E₂ a été attribué seulement à une petite dépression avec roche subaffleurante et fracturée à l'est du lac d'Iffigen. Le reste de la région étudiée a été caractérisée par le critère indexé E₃, correspondant à une absence de morphologie karstique bien marquée. Le critère indexé E₃ occupe la plus grande surface.

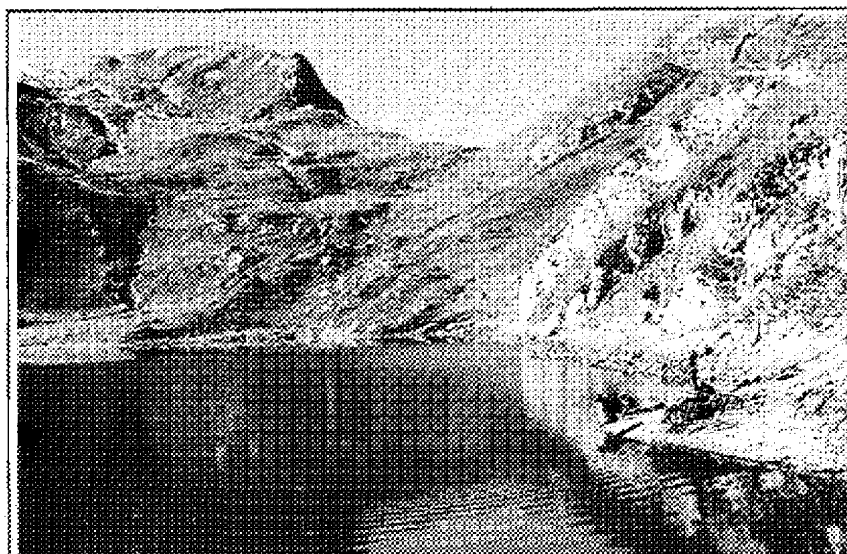


Figure 24. Le lac d'Iffigen, vue vers le nord-ouest. Le réseau karstique et l'épikarst sont considérés comme peu développés. La couverture protectrice est faible, sauf à gauche sur le replat à mi-hauteur (P₃) et au bord du lac (P₂). (photo A. Wildberger)

P - couverture protectrice (annexe 5)

La couverture protectrice est constituée d'une part du sol pédologique (épaisseur variant de 0 à 30 - 40 cm), et d'autre part de formations quaternaires (moraines, éboulis) qui peuvent atteindre des épaisseurs de plus de 2.5 mètres.

L'évaluation de ce critère a été effectuée à partir de l'observation des photos aériennes, de la carte géologique et de vérifications visuelles et à la tarière sur le terrain. La tarière est peu utile dans ce type de couverture, le sol dépassant rarement 20 cm et les formations hétérogènes morainiques étant difficilement pénétrables.

La région étudiée (Mittaghorn - Niesenhorn) est caractérisée, sur une grande surface, par une couverture de faible épaisseur (P₁ et P₂). Les zones d'éboulis de pente, considérés ici comme peu perméables, ont été caractérisés à l'aide du critère indexé P₃, les épaisseurs dépassant aisément le mètre. Le secteur de Sandboden, constitué de sédiments quaternaires de plusieurs mètres d'épaisseur et de faible conductivité hydraulique, donnant souvent lieu à des inondations temporaires, a été attribué à P₄.

I - conditions d'infiltration (annexe 6)

Les conditions d'infiltration ont été évaluées à partir de la carte topographique et de quelques vérifications sur le terrain. Les secteurs avec une pente de plus de 25 %, ainsi que les zones de pieds de pente en dehors de bassins versants de pertes et de cours d'eau, ont été cartographiés manuellement à partir de la carte au 1:10'000. Les zones de pieds de pente occupent 50 mètres de part et d'autre de la ligne délimitant les pentes supérieures à respectivement 10% et 25% selon le type de végétation (voir figure 11).

Un modèle numérique d'altitude n'était pas disponible pour la région étudiée. Pour une surface modeste comme ici, il est tout à fait pensable de faire ce travail manuellement. Effectuer la délimitation des zones de pieds de pente à l'aide d'un système d'information géographique est certes rapide, mais se fait directement à l'écran et nécessite par conséquent le contrôle de la validité des résultats dans certains secteurs.

La plus grande partie de la région étudiée est caractérisée par le critère indexé I_4 . Trois pertes, ainsi que les pertes du lac d'Iffigen, sont classées en I_1 . Les secteurs caractérisés par I_2 et I_3 sont ceux comprenant des écoulements de surface permanents et temporaires, en amont et en aval du lac d'Iffigen.

K - développement du réseau karstique (annexe 7)

Les sources de Blatti se situent juste en aval de la fenêtre tectonique de Schwand. Elles sourdent du Schrattenkalk en traversant la série du Hohgant. L'ancienne source (petite grotte dans des calcaires nummulitiques bien karstifiés) a été utilisée par la commune de La Lenk jusqu'en 1963. Suite à des périodes de sécheresse, une amélioration du débit a été nécessaire et le captage de la nouvelle source a été effectué 10 mètres au-dessous du niveau de la résurgence naturelle de l'ancienne source. Le débit annuel moyen varie entre 6'000 et 9'000 l/min.

Les sources de Blatti constituent l'exutoire de base du système karstique complexe du bassin d'alimentation de l'Iffigbach (nappe du Wildhorn), les sources de Felsen et d'Iffigläger étant des sources de débordement du système amont. On peut distinguer deux parties principales du système: la partie aval, avec la zone d'émergence des sources de Blatti et la zone d'alimentation de l'anticlinal du Hohberg au nord de la faille du même nom, et la partie amont comprenant le sous-bassin des sources de Felsen et d'Iffigläger. Ce sous-bassin amont, comprenant les sommets du Niesenhorn et du Hahenschritthorn, s'étend principalement à l'ouest et au sud-ouest du lac d'Iffigen.

Les hydrogrammes des sources de Blatti (Nabholz & Häberli 1972-1979) montrent que les deux sources réagissent de manière similaire. La nouvelle source, située plus bas, délivre le débit de base et présente des amplitudes moindres. L'ancienne source émerge d'une grotte naturelle, qui démontre la présence d'un réseau karstique bien développé.

Les vitesses d'écoulement de l'eau au cours des essais de traçage effectués depuis les pertes du lac d'Iffigen atteignent quelques 100 m/h. Ces vitesses dénotent la présence d'un réseau karstique bien développé.

Le secteur amont du bassin d'alimentation est drainé par les sources de débordement de Felsen et d'Iffigläger qui présentent des caractéristiques typiques de sources karstiques drainant un karst bien développé. Cependant, une partie des eaux infiltrées dans la partie amont (dans les calcaires de l'Hauterivien et de l'Urgonien) s'écoule directement vers les sources de Blatti (lien hydraulique identifié par essai de traçage, Wildberger 1981); pour atteindre ces sources, les écoulements doivent se faire à la faveur d'accidents tectoniques et au travers des formations peu perméables des couches du Drusberg (calcaires marneux) et des calcaires siliceux de l'Hauterivien. Ces formations ayant des conductivités

hydrauliques moins bonnes que celle des calcaires urgoniens karstifiés, on peut dans ce cas attribuer le critère indexé K_2 pour la partie amont du bassin d'alimentation et le critère indexé K_1 pour les parties en aval, y compris l'anticlinal du Hohberg situé au nord de la faille du même nom (Doerfliger 1996b).

Facteur de protection

La carte de vulnérabilité (*figure 25*) montre que la valeur du facteur de protection varie de 11 à 32.

En dehors des pertes du lac d'Iffigen, les plus grands secteurs à vulnérabilité très élevée (facteur de protection de 14 et 18) correspondent aux lapiez situés au nord et à l'est du lac d'Iffigen.

De grandes plages à vulnérabilité élevée (facteur de protection de 20) correspondent à des zones de roches affleurantes présentant des formes de karstification, une fissuration accentuée, et soumises à des conditions d'infiltration diffuse (entre Sandboden et le Niesenhorn). Le secteur de la faille du Hohberg est caractérisé par un facteur de protection de 21 à 23 et représente une vulnérabilité élevée.

Le secteur le mieux protégé est celui de Sandboden, caractérisé par le critère indexé P_4 (couverture protectrice) et un facteur de protection de 32. Certains secteurs situés dans les parties sud et sud-est de la zone cartographiée sont également très bien protégés ($F = 31$).

Zones de protection

A partir de la carte de vulnérabilité et de la relation d'équivalence du tableau 5, on obtient les zones de protection suivantes (*figure 26*):

Les *zones de protection S1* se concentrent dans la partie nord-est du secteur cartographié; elles comprennent le lac d'Iffigen avec ses pertes et les secteurs de lapiez, les affleurements situés directement à l'est et au nord-est du lac, ainsi que les zones de lapiez sur l'anticlinal du Hohberg au nord de la faille du même nom. On notera que le critère indexé K_1 est attribué à ce dernier secteur car il représente, du fait de la position anticlinale des couches calcaires, une zone d'alimentation préférentielle de l'aquifère alimentant les sources de Blatti.

Les *zones de protection S2* comprennent essentiellement le bassin versant du ruisseau qui s'écoule dans le Hohbergtäli, un ravin flanqué d'éboulis au pied sud du Hochberg, orienté E-W et situé environ 300 m au nord du lac. Ce ruisseau coule sur des dépôts quaternaires dans lesquels il s'infiltré. Des résurgences existent quelque 2 km plus en aval, qui alimentent l'Iffigbach à la hauteur d'Iffigenalp (environ 1 km en aval de la région cartographiée). L'Iffigbach s'infiltré à son tour dans le secteur des sources de Blatti, et peut ainsi fournir une contribution de quelque 0.5% (< 1%) au débit des sources. En raison de la forte dilution des eaux de l'Iffigbach dans l'eau souterraine alimentant les sources de Blatti, et en considérant la bonne qualité bactériologique de l'eau de ces dernières, il est peut-être excessif de vouloir classer le bassin versant du Hohbergtäli, en zone S2 comme proposé ici. Dans une telle situation, la décision doit être prise d'un commun accord entre les autorités concernées et le géologue mandaté.

SITE DE LA LENK (Zone du lac d'Iffigen - Niesenhorn)

La vulnérabilité est exprimée par des facteurs de protection F de 11 à 32.

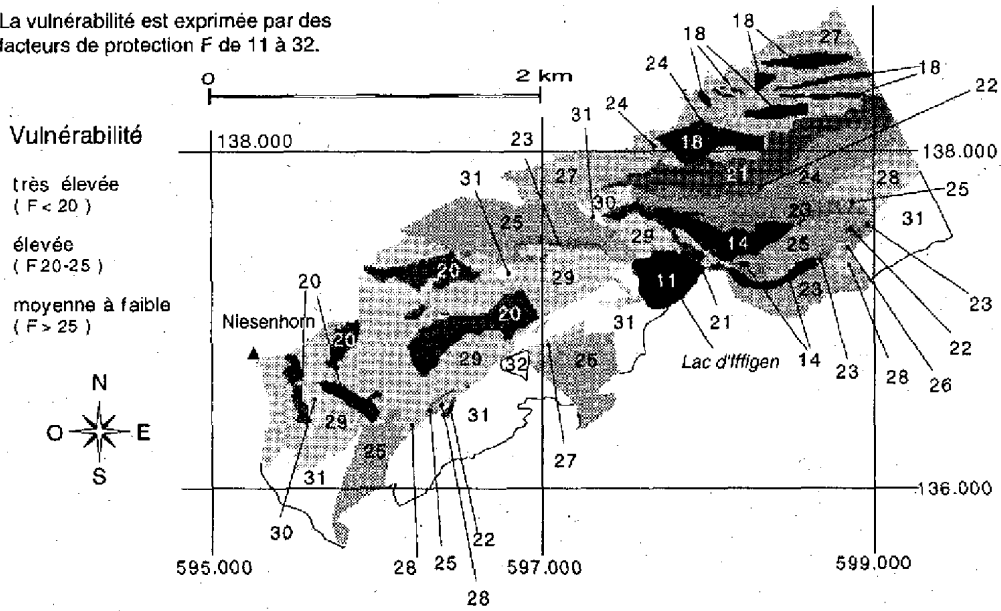


Figure 25. Carte de vulnérabilité du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk (BE). Les trames sont noir à gris très foncé pour $F < 20$, gris foncé à moyen pour $F = 20-25$ et gris clair à blanc pour $F > 25$.

SITE DE LA LENK (Zone du lac d'Iffigen - Niesenhorn)

Carte des zones de protection S

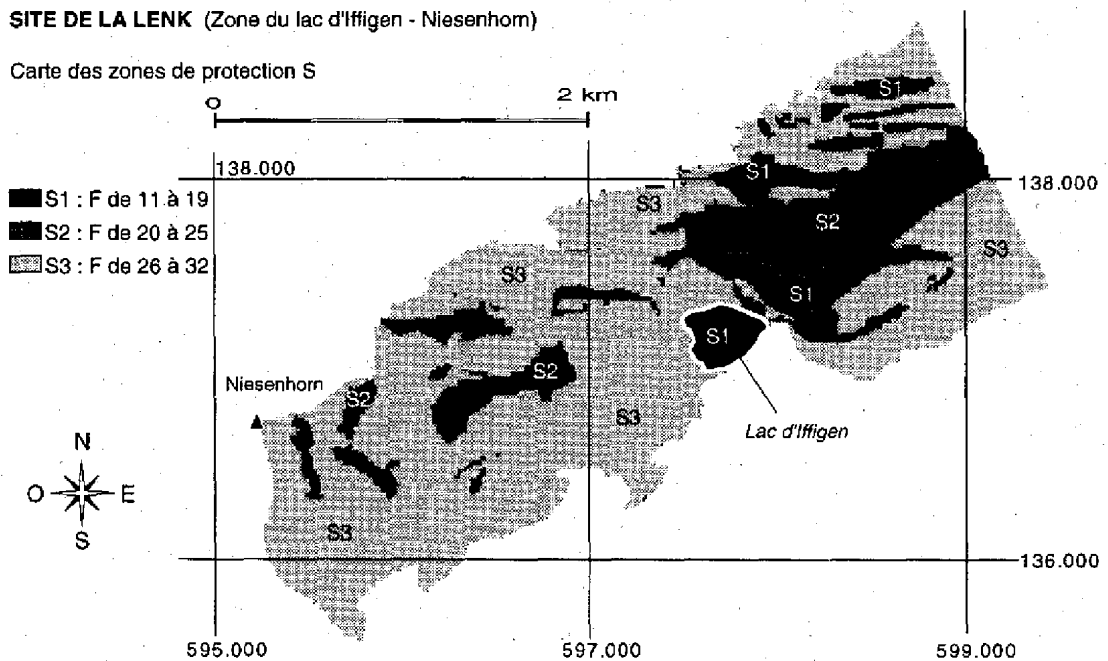


Figure 26. Carte des zones de protection du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk (BE).

Dans le secteur attribué à K_2 (partie sud du sous-bassin amont), la zone S2 occupe diverses petites régions à l'ouest du lac d'Iffigen, caractérisées par E_1 , P_1 et I_1 ou I_4 .

La zone S3 s'étend jusqu'aux limites du bassin d'alimentation. Bien que caractérisé par le critère indexé P_4 et une vulnérabilité minimale, le secteur de Sandboden a été englobé dans la zone S3 en raison de sa faible extension et de sa situation au coeur du bassin d'alimentation.

Conclusions

Le bassin d'alimentation des sources de Blatti est un bassin karstique alpin (figure 27). Il possède une structure complexe due au contexte tectonique; de ce fait il a été opportun d'évaluer le critère K de manière différenciée entre la partie amont et la partie aval.

Dans ce contexte alpin, les formations quaternaires jouent un rôle de couverture protectrice. Les sols, eux, sont minces et leur rôle protecteur n'est pas très important.

Le réseau de drainage des eaux de surface et la présence d'aquifères poreux recouvrant le karst constituent une particularité de ce bassin. Les eaux de ces aquifères s'exfiltrent de manière diffuse dans la zone du lac d'Iffigen, qui possède lui-même des pertes dans l'aquifère karstique, et aussi dans l'Iffigbach, qui s'infiltré dans l'aquifère karstique à proximité des sources de Blatti.

Les zones de protection S1 sont relativement localisées et liées à des objets morphologiques qui peuvent être facilement protégés par des clôtures. Les zones S2 occupent environ 20% de la région cartographiée. Elles correspondent à des secteurs de lapiez ou de cuestas ou à des secteurs à couverture inexistante ou caractérisés par des conditions d'infiltration de type I_2 (bassins versants de ruisseaux, à forte pente).

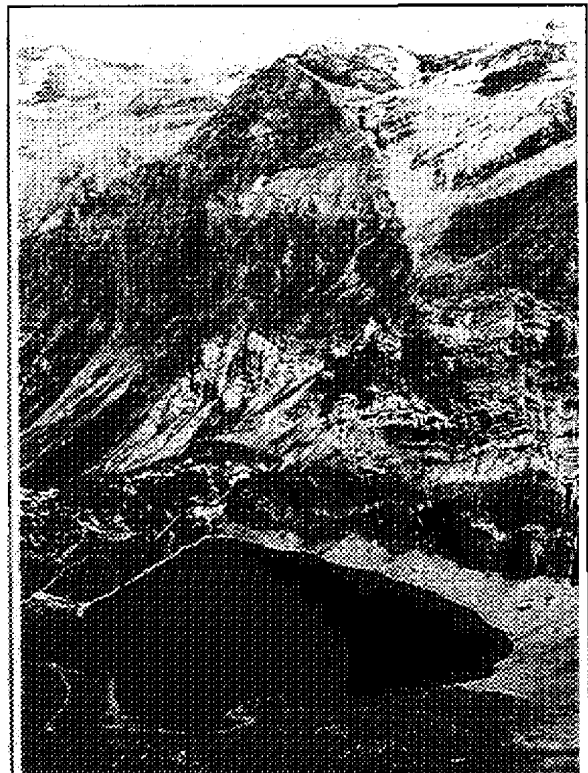


Figure 27. Le lac d'Iffigen vu des contreforts du Niesenhorn. Au centre le Mittaghorn, en bas à gauche le début de la vallée de l'Iffigbach. (photo A. Wildberger)

4.3 Aspects financiers

Les deux exemples d'application de la méthode EPIK présentés ici ont contribué à établir la faisabilité de la méthode pour la délimitation des zones de protection en milieu karstique. Ils ont aussi montré qu'il est possible, en pratique, de délimiter de manière différenciée, et sur la base de critères rigoureux, des zones plus ou moins sensibles aux pollutions.

Le **tableau 6** donne un aperçu du nombre d'heures qui ont été nécessaires pour évaluer les différents critères. On y a distingué les méthodes régionales (études de bureau d'après documents de synthèse) des méthodes locales (études de détail, notamment sur le terrain). On voit que plus le bassin à caractériser est grand, plus le nombre d'heures par km² est faible (au total 2.1 pour St-Imier et 5.5 pour La Lenk). Les indications du tableau 6 ne tiennent pas compte du temps utilisé pour la digitalisation et le traitement des données à l'aide du SIG. Pour l'exemple de St-Imier (70 km²), ce travail (traitement informatique: digitalisation, attribution des coefficients de pondération, production des cartes - sortie graphique) a nécessité 6 jours, soit 0.7 h par kilomètre carré. Pour l'exemple de La Lenk (8 km²), il a nécessité au minimum 4 jours, soit plus de 4.2 h par kilomètre carré. On constate qu'indépendamment de la surface à traiter, quelques jours sont nécessaires pour le traitement graphique et informatique des données.

Tableau 6. Nombre d'heures par km² pour évaluer les 4 critères de la méthode EPIK.

critères	E		P		I		K	
	méthodes régionales	méthodes locales	méthodes régionales	méthodes locales	méthodes régionales	méthodes locales	méthodes régionales	méthodes locales
St-Imier	0.4	0.1	0.1	0.7	0.1	0.5	0.15	0.05
total	0.5		0.8		0.6		0.2	
La Lenk	0.5	3	-	1.0	0.5	-	0.4	0.1
total	3.5		1.0		0.5		0.5	

Les nombres d'heures indiqués dans le tableau 6 pour effectuer la délimitation de zones de protection dans un bassin sont représentatifs si un minimum de connaissances géologiques et hydrogéologiques sont disponibles. Pour les deux exemples traités ici, la délimitation des zones de protection avait déjà été réalisée. La délimitation du bassin d'alimentation a été effectuée à partir des données géologiques et hydrogéologiques (essais de traçage) existantes, sans qu'il soit nécessaire de procéder à de nouveaux essais de traçage. Dans les deux cas, on disposait d'hydrogrammes des sources à protéger. Par contre, aucune carte pédologique des sites n'était disponible, ni aucune information relative à des forages ou à des fouilles.

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'utilisation de critères tenant compte du fonctionnement hydrogéologique du karst, tels que l'*épikarst*, la *couverture protectrice*, les *conditions d'infiltration* et le *développement du réseau karstique*, permet d'obtenir des cartes de la vulnérabilité des captages en milieu karstique. Ces cartes constituent une nouvelle base pour l'établissement des zones de protection en terrain karstique. Les exemples d'application de cette méthode sur plusieurs sites tests, dont deux sont présentés ici, ont démontré la faisabilité et l'intérêt de cette nouvelle approche. Les sites tests ont été choisis dans divers environnements karstiques tels que les karsts jurassiens (Jura plissé et tabulaire), préalpins et alpins. Compte tenu des résultats obtenus, *la méthode proposée est considérée comme applicable de manière générale pour les conditions suisses. Par souci de transparence, il est instamment recommandé que les données chiffrées relatives à l'évaluation des critères E, P, I et K figurent dans le rapport d'expert (hydrogéologue) pour les zones de protection.*

L'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) pour l'étude des différents sites tests, par exemple pour le cas de St-Imier, a permis de mettre au point les différents aspects quantitatifs de la méthode, et de réaliser les tests de sensibilité nécessaires. Cet outil a également permis de simplifier largement l'obtention de la carte du facteur de protection (carte de vulnérabilité). Si l'utilisation d'un SIG n'est pas obligatoire, elle peut cependant faciliter considérablement le travail, selon la taille du bassin d'alimentation.

La contamination des aquifères karstiques n'est pas une fatalité. Des zones de protection délimitées en adéquation avec le fonctionnement hydrogéologique du karst, combinées avec leurs mesures de protection respectives, peuvent à l'évidence réduire considérablement les risques de pollution. Considérant le caractère souvent local des risques potentiels de contamination du bassin d'alimentation des sources (zones de trafic routier ou ferroviaire, décharges, carrières, fermes avec fosses à purin ou silo, garages), la méthode EPIK, basée sur des critères hydrogéologiques spécifiques, permettra à l'avenir une meilleure protection des sources et captages en milieu karstique.



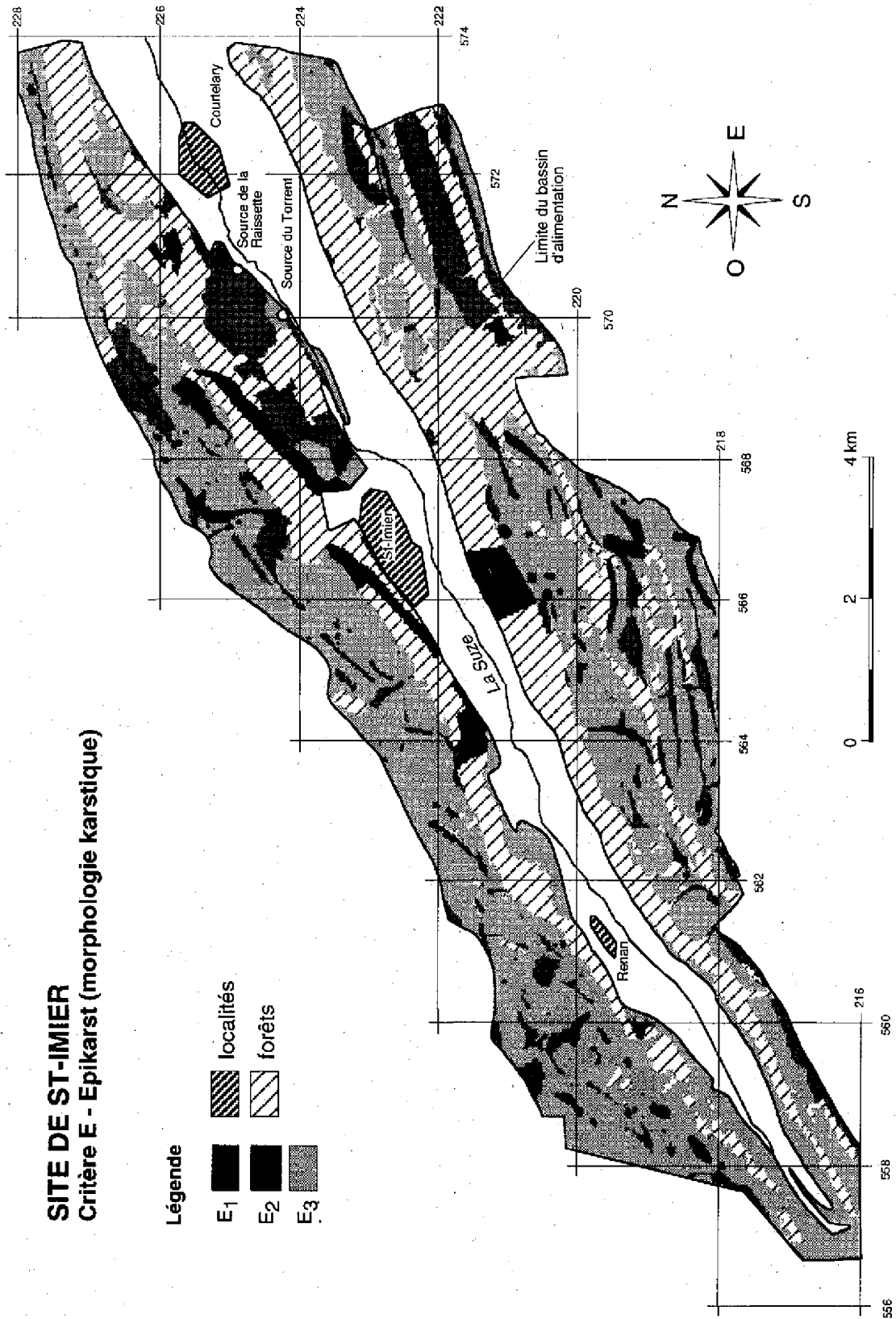
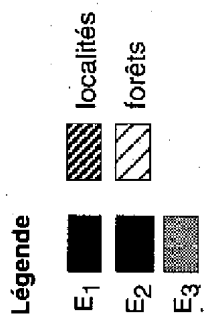
Sources de Sibe Brünne près de La Lenk, BE. (photo A. Wildberger)

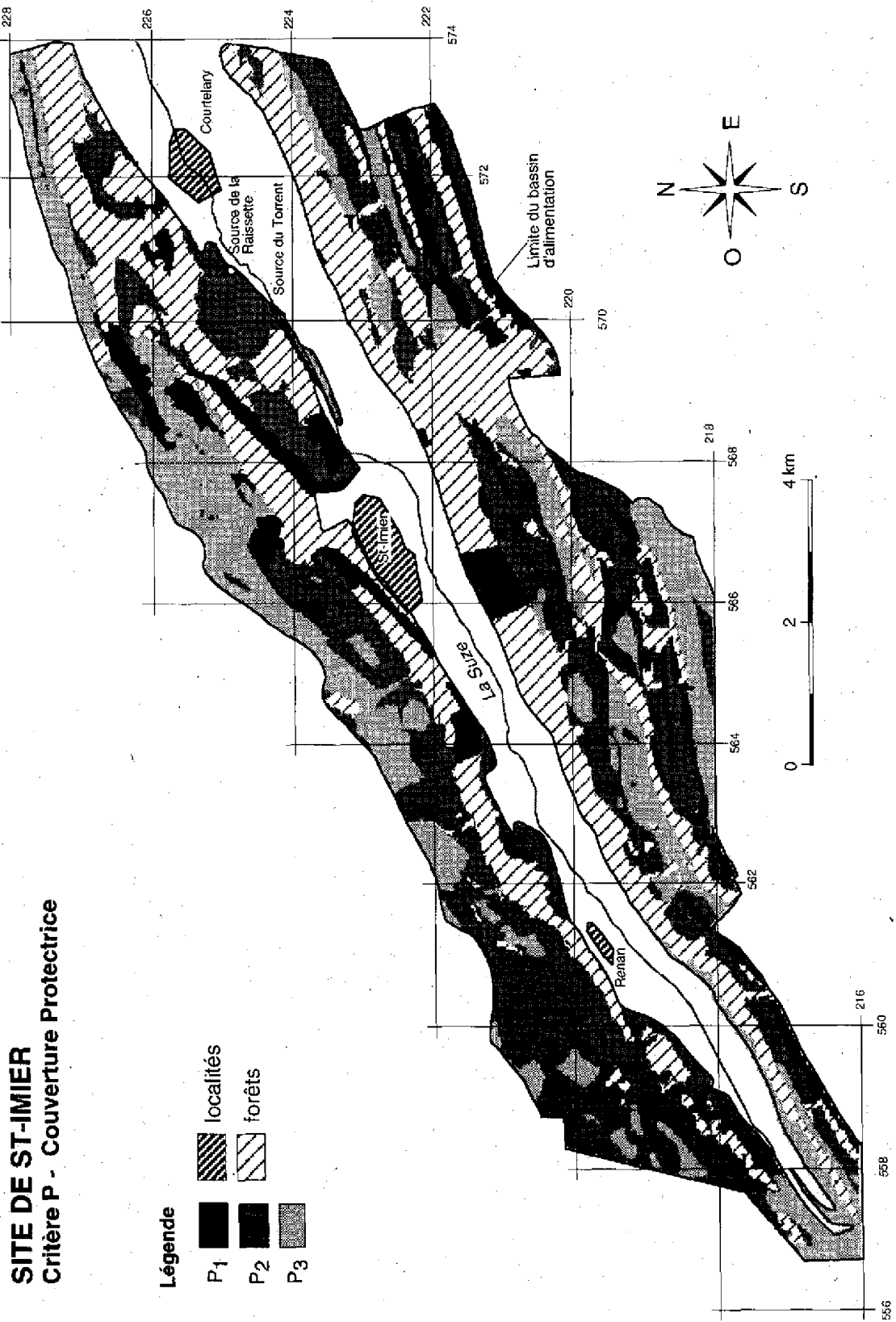
6 ANNEXES

- Annexe 1 Carte de l'épikarst - morphologie karstique - du bassin d'alimentation des sources de St-Imier - partie bernoise du bassin d'alimentation.
- Annexe 2 Carte de la couverture protectrice du bassin d'alimentation des sources de St-Imier - partie bernoise du bassin d'alimentation.
- Annexe 3 Carte des conditions d'infiltration du bassin d'alimentation des sources de St-Imier - partie bernoise du bassin d'alimentation.
- Annexe 4 Carte de l'épikarst - morphologie karstique - du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.
- Annexe 5 Carte de la couverture protectrice du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.
- Annexe 6 Carte des conditions d'infiltration du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.
- Annexe 7 Carte du développement du réseau karstique du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.

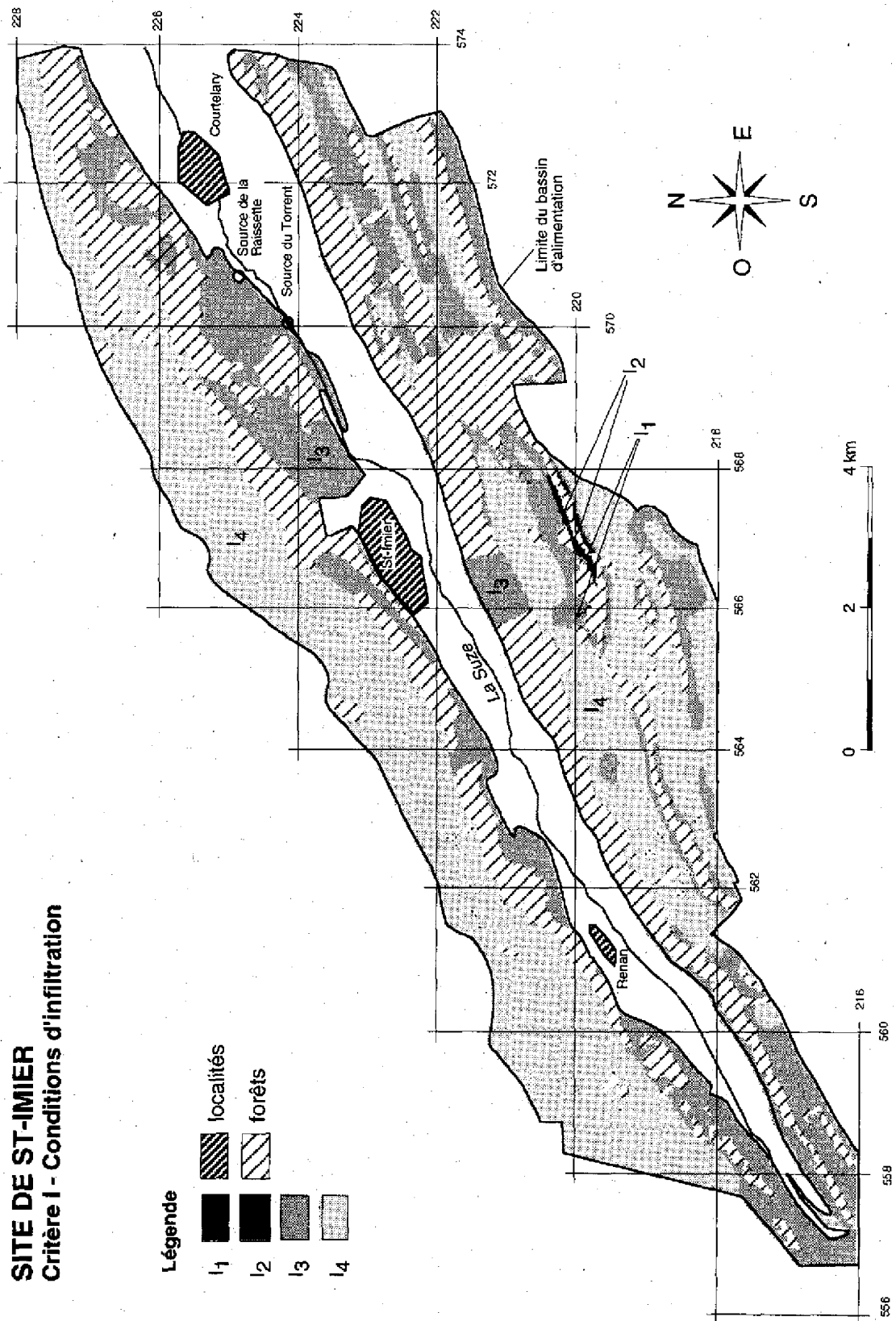
Annexe 1. Carte de l'épikarst - morphologie karstique - du bassin d'alimentation des sources de St-Imier - partie bernoise du bassin d'alimentation.

SITE DE ST-IMIER
Critère E - Epikarst (morphologie karstique)





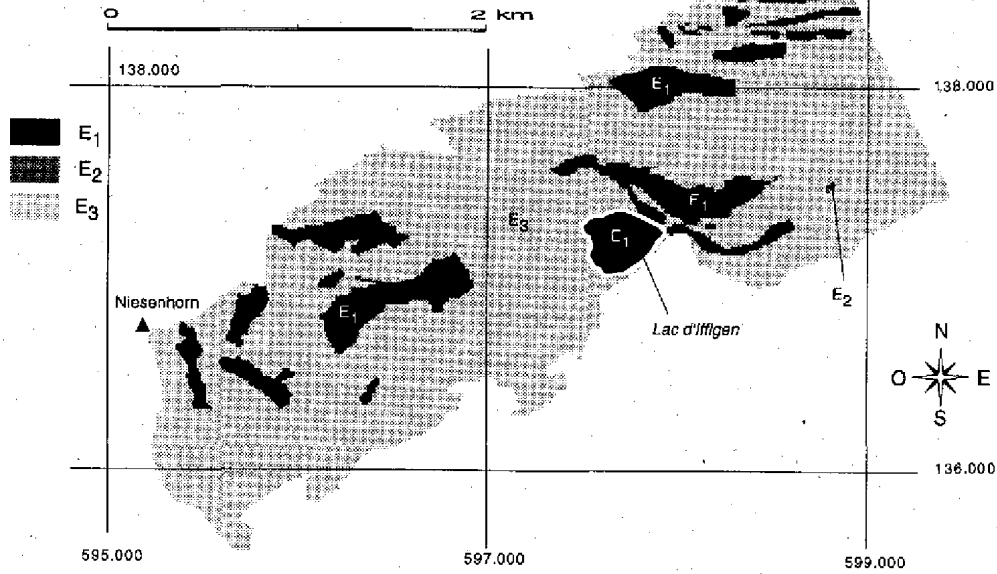
Annexe 3. Carte des conditions d'infiltration du bassin d'alimentation des sources de St-Imier - partie bernoise du bassin d'alimentation.



Annexe 4. Carte de l'épikarst - morphologie karstique - du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.

SITE DE LA LENK (Zone du lac d'Iffigen - Niesenhorn)

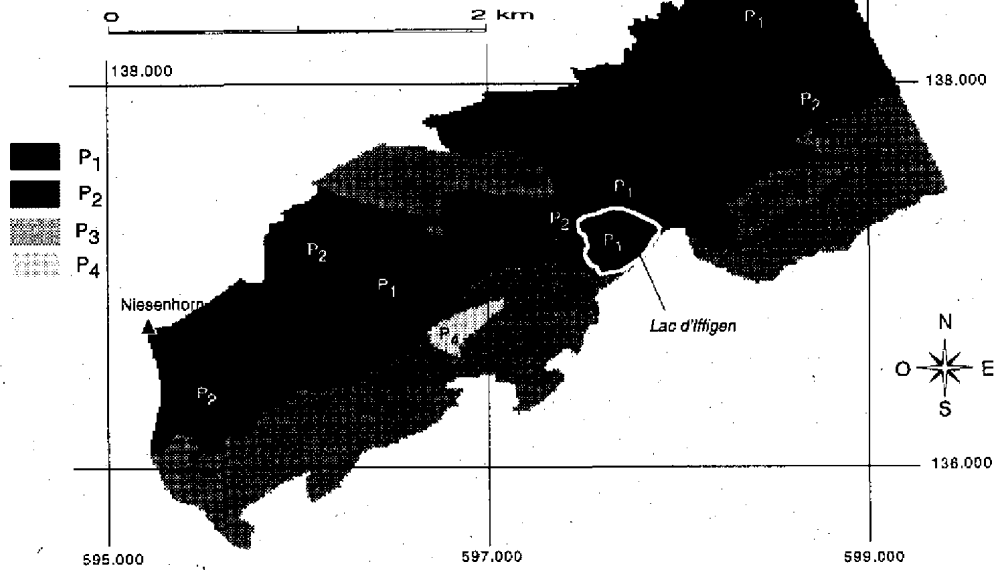
Critère E - Épikarst (morphologie karstique)



Annexe 5. Carte de la couverture protectrice du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.

SITE DE LA LENK (Zone du lac d'Iffigen - Niesenhorn)

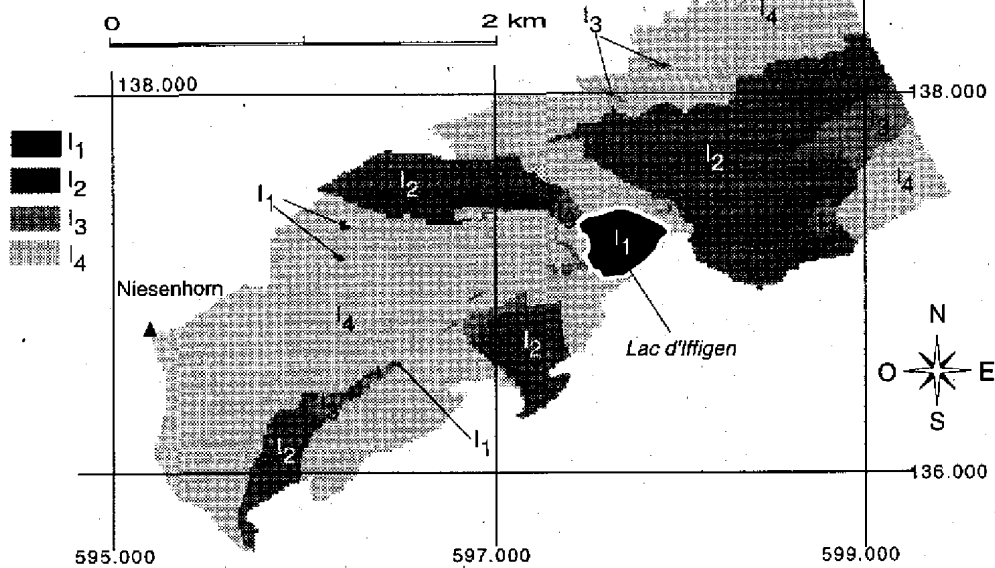
Critère P - Couverture protectrice



Annexe 6. Carte des conditions d'infiltration du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.

SITE DE LA LENK (Zone du lac d'Iffigen - Niesenhorn)

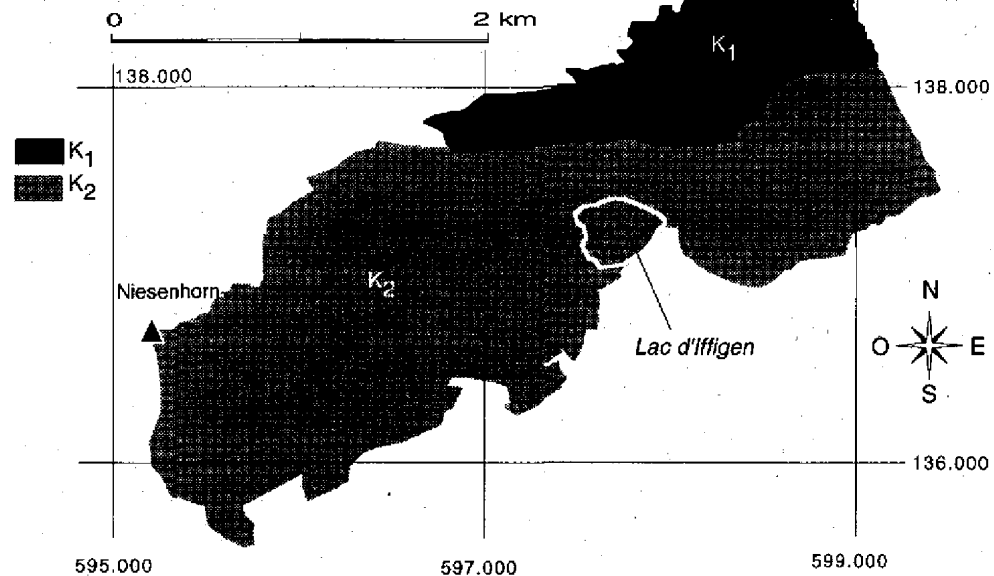
Critère I - Conditions d'infiltration



Annexe 7. Carte du développement du réseau karstique du secteur amont du bassin d'alimentation des sources de Blatti - La Lenk, BE.

SITE DE LA LENK (Zone du lac d'Iffigen - Niesenhorn)

Critère K - Développement du réseau karstique



7 BIBLIOGRAPHIE

- Badoux, H., Gagnebin, E., Lombard, A., McConnell, R.B., de Raaf, M., Schaub, H.P. & Vischer, A. 1962: Atlas géologique de la Suisse au 1:25'000, feuille 41 - Lenk. Commission géologique suisse.
- Badoux, H. & Lombard, A. 1962: Atlas géologique de la Suisse au 1:25'000, feuille 41 - Lenk, notice explicative. Commission géologique suisse.
- Bonacci, O. 1987: Karst Hydrology, with special reference to the Dinaric Karst. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 184 p.
- Dodge, M. 1982: Structure, fonctionnement hydrodynamique et vulnérabilité des aquifères karstiques. In: Journée d'étude sur la protection des eaux karstiques, Bruxelles, 29 nov. 1982. - Soc. nationales des distributions d'eau et comm. de protection des sites spéléologiques, 42-46.
- Doerfliger, N. 1996a: Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method). Thèse, Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel.
- 1996b: Cartographie de la vulnérabilité selon la méthode EPIK dans le bassin d'alimentation des sources de la Lenk (BE). Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne, 20 p., inédit.
- Doerfliger, N. & Tâche, E. 1995: Vulnérabilité des eaux dans les régions karstiques et délimitation des zones de protection; méthodologie EPIK. Rapport intermédiaire, phase 3a 1994/1995, Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, pour l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, inédit.
- Ford, T.D. & Williams, P.W. 1989: Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman, London, Boston, Sydney, Wellington, 601 p.
- Gilbrich, W.H. & Zaporozec, A. 1994: Introduction. In Vrba J. & Zaporozec A. (eds): Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH, International contributions to hydrogeology 16: 1-2, Hannover.
- Grasso, A.D. & Jeannin, P.-Y. 1994: Etude critique des méthodes d'analyse de la réponse globale des systèmes karstiques; application au site de Bure (JU, Suisse). Bulletin d'Hydrogéologie N° 13, 87-113, Peter Lang, Berne.
- Gretillat, P.-A. 1986: Etude pour l'établissement d'une décharge cantonale de classe 3 dans la région des Convers (NE). Mémoire de diplôme de 3ème cycle en hydrogéologie, Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 57 p., inédit.
- Jäckli AG & OEHE 1981: Hydrogéologie du Vallon de St-Imier, données pour la protection et la gestion de l'eau souterraine du canton de Berne. Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne (OEHE).
- Jeannin, P.-Y. 1996: Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques. Thèse, Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel.
- Jeannin, P.-Y. & Grasso, A.D. 1995: Recharge respective des volumes de roche peu perméable et des conduits karstiques, rôle de l'épikarst. Bulletin d'Hydrogéologie N° 14, 95-111, Peter Lang, Berne.

Jeannin, P.-Y., Király, L. & Doerfliger, N. 1993: Développements possibles dans le domaine de la détermination des zones de protection, concept de vulnérabilité des aquifères karstiques. Rapport de la première phase du projet, Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, pour le Service hydrologique et géologique national, inédit.

Kellerhals + Haefeli AG 1988: Schutzzonen für die Blatti-Quelle der WV Lenk. Bericht Nr. 1140 vom 18.2.1988, Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern, unveröffentlicht.

Klimchouk, A. 1995: Karst morphogenesis in the epikarstic zone. Cave and Karst science Vol. 21, N° 2, March 1995. Transactions of the British Cave Research Association, 45-50.

Mangin, A. 1975: Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse de Doctorat d'Etat, Dijon, 124p. Ann. Speleo., 1974 19(3), 283-332; 29(4), 495-601; 30(1), 21-124.

Nabholz, W. & Häberli, W. 1972-1979: Berichte über hydrologische Messungen Rawil-Nordseite, unveröffentlicht.

OFPE (Office fédéral de la protection de l'environnement) 1982: Instructions pratiques pour la détermination des secteurs de protection des eaux, des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines. Octobre 1977, révision partielle en 1982.

Sautier, J.-L. 1984: Guide du Service Fédéral d'Améliorations foncières, 1984.

Schindler, B. 1988: Etude hydrogéologique de la zone S des captages sis à Cormoret et Villeret, 2ème partie. Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne (OEHE), inédit.

Smart, P. & Friedrich, H. 1986: Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer. Mendip Hills, England, Proc. Conf. env. problems of karst terranes and their solutions, 1986, National Water Well Association, Dublin, Ohio, 59-87.

Tâche, E., Doerfliger, N. & Zwahlen, F. 1996: Vulnérabilité des eaux dans les régions karstiques et délimitation des zones de protection, méthodologie EPIK. Rapport de la phase 3b 1995/1996, Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, pour l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, inédit.

Wildberger, A. 1981: Zur Hydrogeologie des Karstes im Rawil-Gebiet. - Beitr. Geol. Schweiz - Hydrol. 27 (version raccourcie de la thèse 1979, Université de Berne).

- 1984: Karst du Rawil (Hautes-Alpes calcaires helvétiques, Suisse occidentale); matières dissoutes et en suspension emportées par les sources. Karstologia N° 4, 29-34.

Williams, P.W. 1983: The role of subcutaneous zone in karst hydrology. J. Hydrol. 61, 45-67.

Zaporozec, A. 1985: Groundwater pollution potential of Barron County, Wisconsin. Wis. Geological and Natural History Survey, Madison, WI.

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).