



# Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

Guide méthodologique

BRGM/RP-55874-FR  
septembre 2007



Source de Rupt aux Nonains © BRGM

# Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

Guide méthodologique

**BRGM/RP-55874-FR**  
septembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM 07EAU06

**J.F. Vernoux, A. Wuilleumier, N. Dörfliger**

**Vérificateur :**

Nom : A. Gutierrez

Date : 3 décembre 2007

Original signé

**Approbateur :**

Nom : D. Pennequin

Date : 24 janvier 2008

Original signé

Mots clés : délimitation, bassin d'alimentation, captage, vulnérabilité, pollution diffuse, bassin Seine-Normandie

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

Vernoux J.F., Wulleumier A., Dörfliger N. (2007) - Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique, rapport BRGM/RP-55874-FR, 75 pages, 14 illustrations

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

En réponse aux exigences issues de la directive cadre sur l'eau, la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30/12/06 a renforcé les dispositifs de maîtrise des pollutions diffuses d'origine agricole par la création des zones de protection des aires d'alimentation de captages. La mise en œuvre de ce nouveau dispositif de protection de la ressource impose de disposer d'une méthodologie commune à l'échelle nationale pour la délimitation des aires d'alimentation de captages (AAC).

Il est par ailleurs nécessaire de pouvoir cibler les programmes d'action sur les secteurs les plus vulnérables des AAC, afin de permettre aux agences de l'eau de concentrer leurs efforts. La définition d'une méthodologie opérationnelle de cartographie des zones les plus vulnérables de l'aire d'alimentation du captage aux pollutions diffuses permettra de répondre à cet objectif.

L'étude proposée et financée par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, la Direction de l'Eau du MEDAD et le BRGM vise donc à élaborer dans ce contexte une méthodologie de délimitation des aires d'alimentation de captages et de leur vulnérabilité intrinsèque aux pollutions diffuses. Pour les eaux souterraines, il convient de considérer que les notions de « bassin d'alimentation de captages » (BAC) et « d'aire d'alimentation de captages » (AAC) sont équivalentes.

Elle comporte trois phases :

- Etat des lieux sur la définition des AAC et de leur vulnérabilité
- Méthodologie de délimitation des AAC et des zones sensibles vis-à-vis des pollutions diffuses
- Application de la méthodologie sur six bassins test

**Le présent rapport rend compte de la deuxième phase de l'étude. Il est rédigé sous la forme d'un guide méthodologique destiné aux collectivités maîtres d'ouvrage des études sur les bassins d'alimentation de captage et aux bureaux d'études, maîtres d'œuvre de ces études.**

Cette méthodologie a été développée en fonction des types d'aquifères rencontrés sur le bassin Seine-Normandie (alluvial, sédimentaire karstique ou non, socle). Elle peut néanmoins s'appliquer à tout type d'aquifère, à partir du moment où l'aquifère étudié a été classé parmi les trois types proposés : aquifère continu, aquifère discontinu fissuré, aquifère discontinu karstique.



## Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Concepts et terminologie .....</b>	<b>9</b>
2.1	NOTION DE BASSIN D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE .....	9
2.2	NOTION D'AIRE D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE .....	10
<b>3</b>	<b>Démarche proposée.....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Typologie du système aquifère.....</b>	<b>23</b>
4.1	TYPES D'AQUIFERES .....	23
4.1.1	Aquifère à porosité d'interstices .....	23
4.1.2	Aquifère karstique .....	24
4.1.3	Aquifère karstique de la craie.....	25
4.1.4	Aquifère fissuré .....	26
4.2	CARACTERISATION DU SYSTEME.....	27
<b>5</b>	<b>Cas d'un système aquifère continu .....</b>	<b>31</b>
5.1	ETUDE ET CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE .....	31
5.2	DELIMITATION DU BAC.....	31
5.2.1	Cas n°1 : le captage est une source.....	32
5.2.2	Cas n°2 : délimitation par approche analytique .....	33
5.2.3	Cas n°3 : délimitation par modélisation maillée simple .....	34
5.2.4	Cas n°4 : délimitation par modélisation maillée complexe .....	34
5.3	CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE .....	35
5.3.1	Choix de la méthode .....	35
5.3.2	Paramètres pris en compte et classification .....	36
5.3.3	Poids des paramètres et classes de vulnérabilité.....	39
5.3.4	Exemple d'application .....	39
<b>6</b>	<b>Cas d'un système aquifère discontinu fissuré.....</b>	<b>41</b>
6.1	ETUDE ET CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE .....	41
6.2	DELIMITATION DU BAC.....	41
6.3	CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE .....	42
6.3.1	Choix de la méthode .....	42
6.3.2	Paramètres pris en compte et classification .....	42
6.3.3	Poids des paramètres et classes de vulnérabilité.....	45
6.3.4	Exemple d'application .....	45
<b>7</b>	<b>Cas d'un système aquifère discontinu karstique.....</b>	<b>47</b>
7.1	ETUDE ET CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE .....	47
7.2	DELIMITATION DU BAC.....	47
7.3	CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE .....	49
7.3.1	Choix de la méthode .....	49
7.3.2	Paramètres pris en compte et classification .....	50

7.3.3 Poids des paramètres et classes de vulnérabilité .....	54
7.3.4 Exemple d'application .....	55
<b>8 Conclusion et perspectives .....</b>	<b>57</b>
<b>9 Sources de données .....</b>	<b>59</b>
<b>10 Boîte à outils.....</b>	<b>63</b>
10.1 OUTILS DE CARTOGRAPHIE .....	63
10.2 OUTILS DE MODELISATION ET DE DELIMITATION DE LA PORTION DE NAPPE ALIMENTANT LE CAPTAGE .....	63
10.3 OUTILS DE CALCUL DU BILAN HYDROLOGIQUE .....	64
<b>11 Eléments de coût.....</b>	<b>65</b>
<b>12 Bibliographie sommaire.....</b>	<b>67</b>
<b>13 Glossaire.....</b>	<b>69</b>

## Liste des illustrations

<i>Illustration 1 - Définition du bassin d'alimentation du captage (in Bussard, 2005).....</i>	<i>9</i>
<i>Illustration 2 – bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre.....</i>	<i>11</i>
<i>Illustration 3 – Exemple de bassin d'alimentation pour une nappe captive.....</i>	<i>12</i>
<i>Illustration 4 – Distinction entre aire d'alimentation et zone d'influence.....</i>	<i>19</i>
<i>Illustration 5 - Paramètres pris en compte pour le calcul de la vulnérabilité pour les trois types d'aquifères.....</i>	<i>21</i>
<i>Illustration 6 - Représentation schématique de quatre aquifères caractérisés par une hétérogénéité croissante A) milieu poreux homogène B) milieu fissuré faiblement hétérogène C) milieu fissuré hétérogène D) milieu karstique (in Pochon &amp; Zwahlen, 2003).....</i>	<i>23</i>
<i>Illustration 7 – Les deux types de systèmes karstiques (in AERMC, 1999).....</i>	<i>25</i>
<i>Illustration 8 – Exemple de fluctuations piézométriques (2004-2007) au fonction du type d'aquifère .....</i>	<i>29</i>
<i>Illustration 9 – Tableau d'aide à la caractérisation des aquifères .....</i>	<i>30</i>
<i>Illustration 10 - carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation du captage de Moulton.....</i>	<i>40</i>
<i>Illustration 11 - Site de Rieden, carte du "facteur de protection final" (in OFEFP, 2004).....</i>	<i>46</i>
<i>Illustration 12 : Triangle des textures des sols .....</i>	<i>52</i>
<i>Illustration 13 : Carte du bassin d'alimentation des captages de Bolbec.....</i>	<i>56</i>
<i>Illustration 14 - Exemple de carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation des captages de Bolbec .....</i>	<i>56</i>

# 1 Introduction

La Directive 2000/60/CE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau fixe des objectifs ambitieux en matière de reconquête de la qualité de la ressource destinée à l'eau potable. Les États membres doivent assurer la protection des captages afin de prévenir la détérioration de leur qualité et réduire le degré de traitement nécessaire à la production d'eau potable, et peuvent à cette fin établir des zones de sauvegarde des captages.

A cet effet, la France a complété son corpus législatif par la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006. Ainsi l'article 21 de cette loi (ou L 211-3, II-5° du code de l'environnement), précisé par le décret du 14.05.07 relatif « aux zones soumises à certaines contraintes environnementales » (articles R.114-1 à R.114-10 du code rural), a renforcé les dispositifs de gestion de la ressource, en créant des zones de protection quantitative et qualitative des aires d'alimentation des captages (AAC), pour lutter notamment contre les pollutions diffuses d'origine agricole.

Des programmes d'action doivent être définis, sur ces zones de protection, pour améliorer la qualité de la ressource utilisée pour l'alimentation en eau potable ou sa disponibilité. Ces programmes, visant à modifier les pratiques agricoles (réduction des intrants, couverture des sols, diversification de l'assolement...), sont mis en œuvre sur la base d'une action volontaire et contractuelle. Ils peuvent cependant devenir d'application obligatoire, si les résultats obtenus sur la base d'une action volontaire sont jugés insuffisants.

L'application de ce nouveau dispositif réglementaire nécessite de disposer d'une méthodologie commune de délimitation de ces aires d'alimentation de captages. Par ailleurs, afin de mieux définir les programmes d'action et de cibler et hiérarchiser les territoires d'action au sein de la zone de protection, il est également nécessaire de définir au sein des AAC les zones les plus vulnérables aux pollutions diffuses, et donc là aussi de disposer d'une méthodologie de définition de cette vulnérabilité.

L'objet du présent guide méthodologique est de répondre à ce besoin.

Il vise à fournir un support, destiné aux maîtres d'ouvrage porteurs des projets territoriaux, afin de faciliter la rédaction des cahiers des charges des études à conduire pour la délimitation des AAC et de leur vulnérabilité.

Il doit ainsi permettre aux bureaux d'étude concernés d'utiliser une trame méthodologique commune.

Il importe de souligner de prime abord la spécificité des choix qui ont été faits pour élaborer ce guide méthodologique, au regard des textes réglementaires :

- Le dispositif réglementaire, issu de l'article 21 de la loi sur l'eau, invoque, sans la définir, la notion d'aire d'alimentation de captages. Il vise la protection de l'ensemble



des captages d'eau potable, que ceux-ci correspondent à des forages ou des sources (cas des eaux souterraines), ou à des captages en eaux superficielles.

- La méthodologie développée dans le présent rapport ne concerne par contre que les captages d'eau souterraine, et mobilise à cette fin un autre concept, issu de la bibliographie existante dans le domaine de l'hydrogéologie, celui de bassin d'alimentation de captages.

Il conviendra, pour l'utilisation de ce guide dans le contexte d'une mise en œuvre des dispositions issues de l'article 21 de la loi sur l'eau, et pour ce qui concerne les eaux souterraines, de considérer les notions « d'aires d'alimentation de captage » et de « bassin d'alimentation de captage » comme synonymes (cf. chapitre « concepts et terminologie » du présent rapport<sup>1</sup>).

Ce dispositif issu de l'article 21 de la loi sur l'eau comporte plusieurs étapes : délimitation de l'AAC, diagnostic des pressions agricoles, élaboration des programmes d'action. La démarche proposée dans ce guide vise uniquement la délimitation du bassin d'alimentation du captage (ou AAC) et la cartographie de sa vulnérabilité. Le volet relatif au diagnostic des pressions agricoles et à l'élaboration des programmes d'action du dispositif global n'est pas traité ici.

La méthodologie est adaptée à l'échelle de travail choisie pour assurer la protection de captages d'eau potable, en hiérarchisant les zones à protéger. La protection de la ressource, à l'échelle de l'aquifère, n'est pas traitée ici.

Il faut rappeler les inévitables limites d'un tel guide, liées à la très grande diversité et à la complexité des contextes hydrogéologiques : la méthodologie proposée est nécessairement simplificatrice ; elle s'appliquera plus ou moins bien selon les cas ; elle nécessitera plus ou moins de données. Elle se justifie par l'impossibilité de protéger l'ensemble de l'aire d'alimentation du captage et vise essentiellement à hiérarchiser les zones à protéger. Enfin la mise en œuvre de la méthodologie et la qualité du résultat final dépendront pour beaucoup de l'étude géologique et hydrogéologique du site. Il conviendra donc, le cas échéant, de l'adapter en fonction des spécificités des situations rencontrées.

Ce guide fait suite à une synthèse bibliographique auquel le lecteur pourra se référer pour plus de détail sur les concepts, méthodes et outils mis en œuvre (Vernoux et al., 2007).

Enfin, des exemples concrets de sa mise en œuvre sur six bassins test sont présentés dans un rapport spécifique (Vernoux et al., 2007a). Certains d'entre eux sont utilisés pour illustrer le guide méthodologique. Ces exemples ont permis de tester la mise en œuvre de la méthode, mais il ne s'agit pas pour autant d'études exhaustives telles que celles qui devront être réalisées sur l'initiative des maîtres d'ouvrage.

---

<sup>1</sup> Pour les captages en eaux superficielles, la notion « d'aire d'alimentation de captage » renverra par contre à celle de bassin versant en amont de la prise d'eau.

## 2 Concepts et terminologie

### 2.1 NOTION DE BASSIN D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE

Les éléments de ce chapitre sont repris du rapport BRGM/RP-55332-FR auquel le lecteur pourra se référer pour plus de détails (Vernoux et al., 2007b).

Le **bassin hydrogéologique d'un aquifère** ou **bassin versant souterrain** est la partie d'un aquifère, simple ou complexe dans laquelle les eaux souterraines s'écoulent vers un même exutoire ou groupe d'exutoires ; il est délimité par une *ligne de partage des eaux souterraines* qui, à l'encontre de celle des bassins de surface peut être migrante ; c'est l'homologue souterrain d'un bassin versant pour les eaux de surface. Lorsque l'aquifère est en partie alimenté par l'infiltration d'un cours d'eau, seuls les secteurs du bassin versant de ce cours d'eau qui participent à l'alimentation de l'aquifère par l'infiltration directe des eaux météoriques ou après un court ruissellement diffus sont considérés dans le bassin hydrogéologique.

A l'intérieur d'un bassin versant souterrain, on peut définir une **portion de la nappe d'eau souterraine** alimentant le captage ; elle représente l'ensemble des particules d'eau situé en un endroit quelconque de la zone saturée qui termineront leur course dans le captage (premier schéma de l'illustration 1)

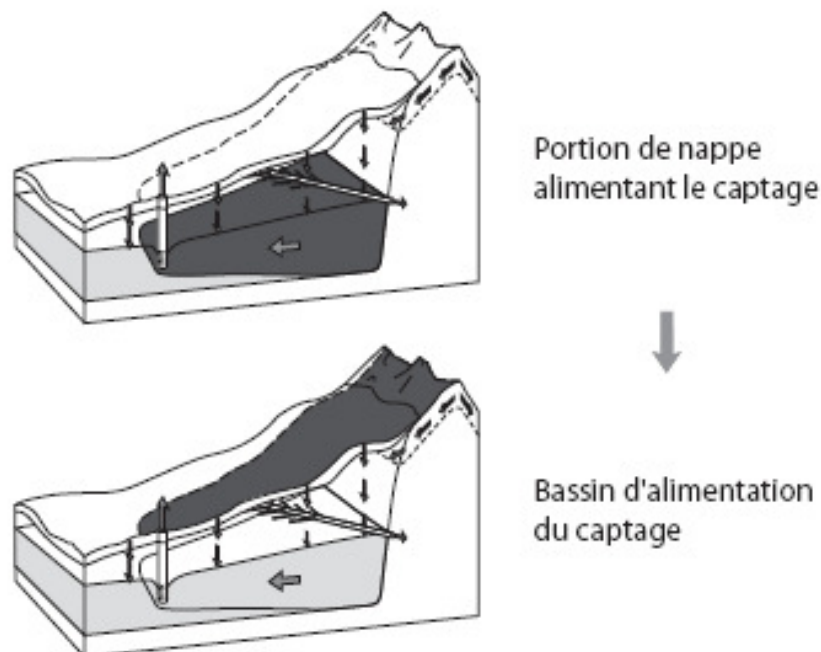


Illustration 1- Définition du bassin d'alimentation du captage (in Bussard, 2005)

Le **bassin d'alimentation d'un captage (BAC)** est le lieu des points de la surface du sol qui contribuent à l'alimentation du captage (second schéma de l'illustration 1). Dans les cas simples, le bassin d'alimentation concerne un seul aquifère et correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage. C'est ce que montre l'illustration 2, en considérant que la surface située entre la crête topographique et la crête piézométrique est infiltrante (premier schéma). Si cette surface était imperméable, le bassin d'alimentation du captage serait plus réduit et à l'inverse le bassin d'alimentation de la source serait plus étendue (second schéma). Dans la pratique une surface étant rarement totalement ruisselante ou infiltrante, la zone située entre la crête topographique et la crête piézométrique devrait être prise en compte pour les deux bassins, les deux BAC ayant alors une partie commune.

Dans des cas plus complexes le bassin hydrogéologique prend en compte plusieurs aquifères. Le bassin d'alimentation du captage est toujours compris à l'intérieur du bassin hydrogéologique de l'aquifère principal mais il peut alors s'étendre au-delà de l'extension structurale de l'aquifère principal.

Le bassin d'alimentation d'un captage qui, rappelons le, est le secteur en surface qui participe à l'alimentation du captage par l'infiltration directe des eaux ou par l'infiltration de cours d'eau, suit généralement la projection verticale de la portion de la nappe qui alimente le captage, mais il peut en différer par ajout ou retrait de zones en surface.

Dans le cas d'une couverture imperméable, il peut arriver qu'une zone à proximité du captage ne participe pas à son alimentation. Elle ne fait donc pas partie du bassin d'alimentation. A l'inverse les zones attenantes (versants en bordure) caractérisées par des écoulements de sub-surface ou par du ruissellement diffus s'infiltrant en partie, participent à l'alimentation du captage.

**La notion de bassin d'alimentation est ainsi étendue par rapport à son acception classique en intégrant les zones de bordures qui contribuent à l'apport de l'eau météorique sur les aires de recharge de l'aquifère**

A l'inverse le BAC peut être de dimension plus réduite si la nappe est captive ou libre mais sous recouvrement argileux (Illustration 3). Ces deux cas de figure sont liés à la présence d'une couche imperméable isolant l'aquifère considéré, soit de la surface du sol, soit d'une nappe sus-jacente. Une formation n'étant jamais totalement imperméable, il convient de définir plus précisément cette notion : nous considérerons comme imperméable, une couche dont la perméabilité est inférieure à  $10^{-9}$  m/s (norme utilisée pour les CET).

## **2.2 NOTION D'AIRE D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE**

La synthèse bibliographique réalisée en préalable à cette étude (cf. rapport BRGM/RP-55332-FR) a montré la diversité des définitions données à la notion « d'aire d'alimentation de captages ». Ces diverses définitions renvoient généralement à une notion topographique de surface en rapport avec l'alimentation d'un captage.

Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

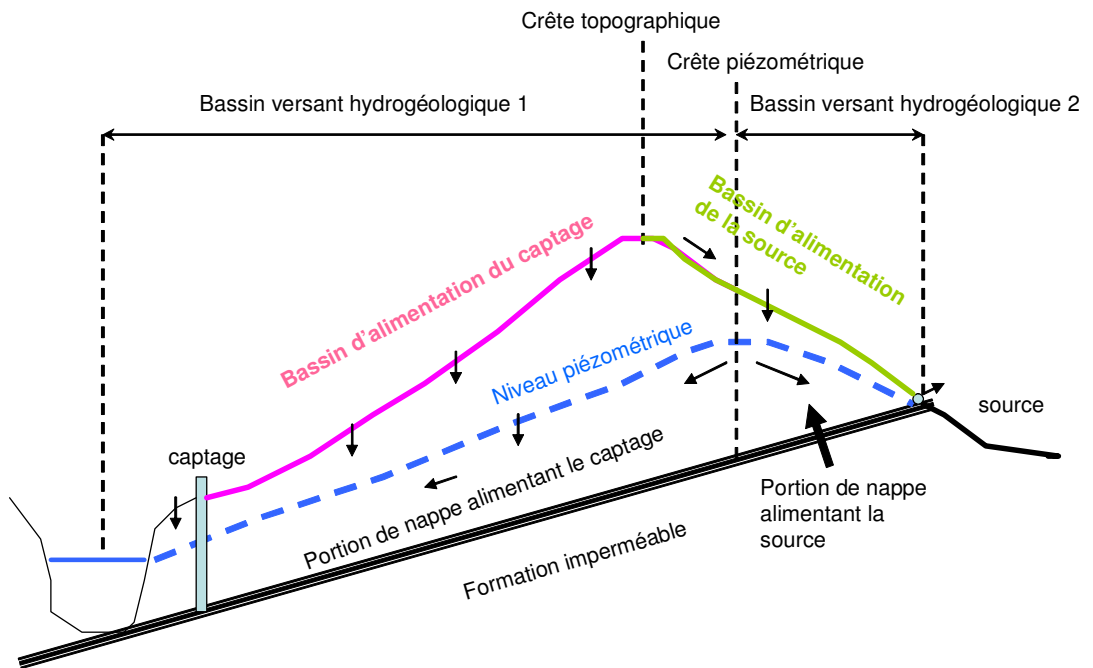
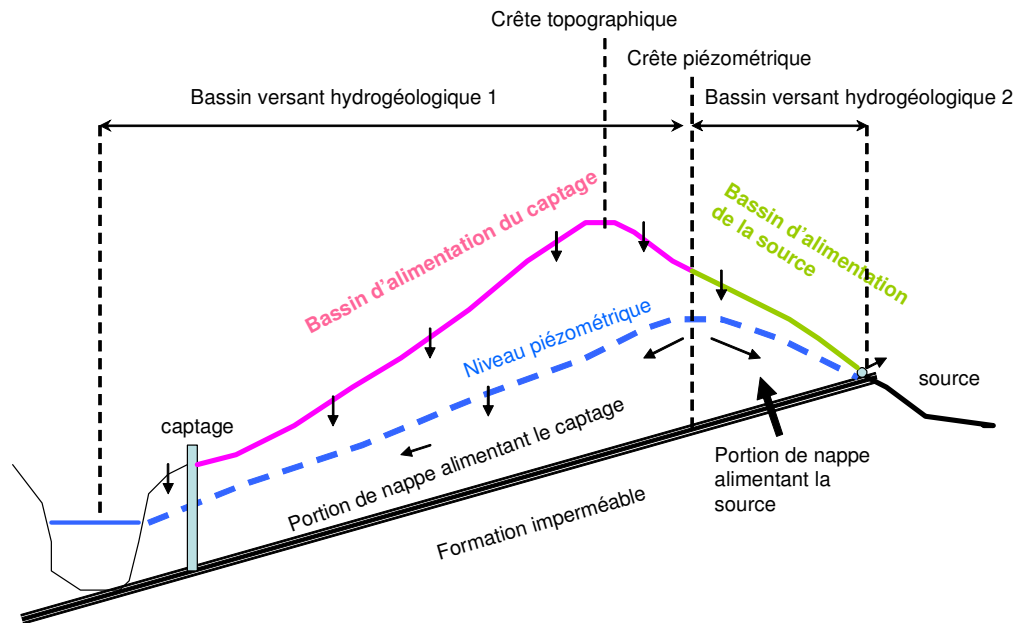


Illustration 2 – bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre

## Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

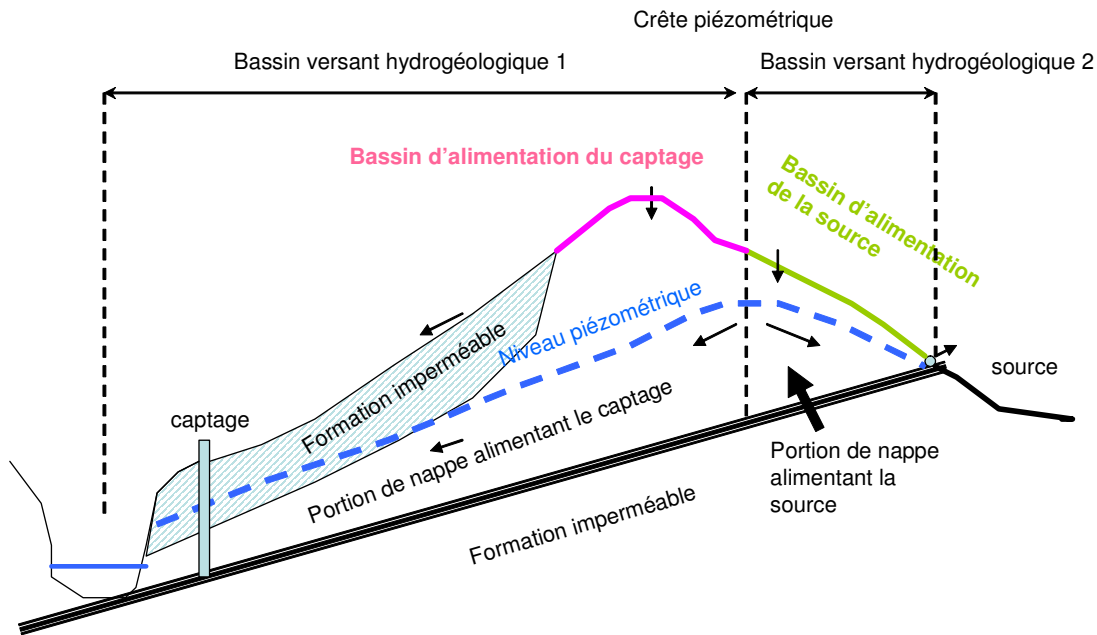


Illustration 3 – Exemple de bassin d'alimentation pour une nappe captive

Par ailleurs, l'article 21<sup>2</sup> de la LEMA du 30/12/06, et le décret du 14.05.07 relatif aux « zones soumises à certaines contraintes environnementales », font référence à des « zones de protection des aires d'alimentation des captages ». Le concept d'aire d'alimentation de captages n'est pas ici mentionné par référence explicite à un concept hydrogéologique, mais en relation avec l'objectif du législateur : assurer la protection de toutes ressources en eau (souterraines ou superficielles) par le biais d'actions à la surface d'un territoire au niveau duquel se fait l'alimentation d'un ou de plusieurs captages d'eau potable.

Les aires d'alimentation de captages visées par ce dispositif correspondent ainsi aux surfaces sur lesquelles l'eau qui s'infiltre ou ruisselle participe à l'alimentation de la ressource en eau dans laquelle se fait le prélèvement.



Cette définition de l'aire d'alimentation de captages correspond à celle qui est donnée plus haut du « bassin d'alimentation d'un captages » (§ 2.1).

**Ainsi, pour ce qui concerne les eaux souterraines, il convient de considérer que les notions de « bassin d'alimentation de captages » et « d'aire d'alimentation de captages » sont équivalentes.**

<sup>2 2</sup> Codifié en l'article L.211-3 alinéa 5 du code de l'environnement

### 3 Démarche proposée

La démarche proposée est schématisée comme suit

<p><b>Phase 1</b> <b>Etude hydrogéologique du bassin versant souterrain</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>- Caractéristiques du captage</li><li>- Synthèse et/ou acquisition de données</li><li>- Compréhension du système aquifère</li><li>- Typologie du système</li><li>- Choix de la méthode</li></ul>
<p><b>Phase 2</b> <b>Délimitation du BAC</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>- Délimiter la portion de nappe alimentant le captage</li><li>- Identifier la zone en surface susceptible d'influer sur la qualité de l'eau du captage</li></ul>
<p><b>Phase 3</b> <b>Cartographie de la vulnérabilité</b></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Identifier à l'intérieur du BAC les secteurs les plus contributifs à l'alimentation du captage et donc les plus vulnérables vis-à-vis d'une pollution</li></ul>

L'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant souterrain est déterminante. Elle permet à la fois de définir le type d'aquifère et sert de base à la délimitation du BAC et à la caractérisation des paramètres de vulnérabilité. C'est lors de cette étude que seront acquises les données nécessaires permettant de définir la typologie du système et à partir de là, la méthode à appliquer.

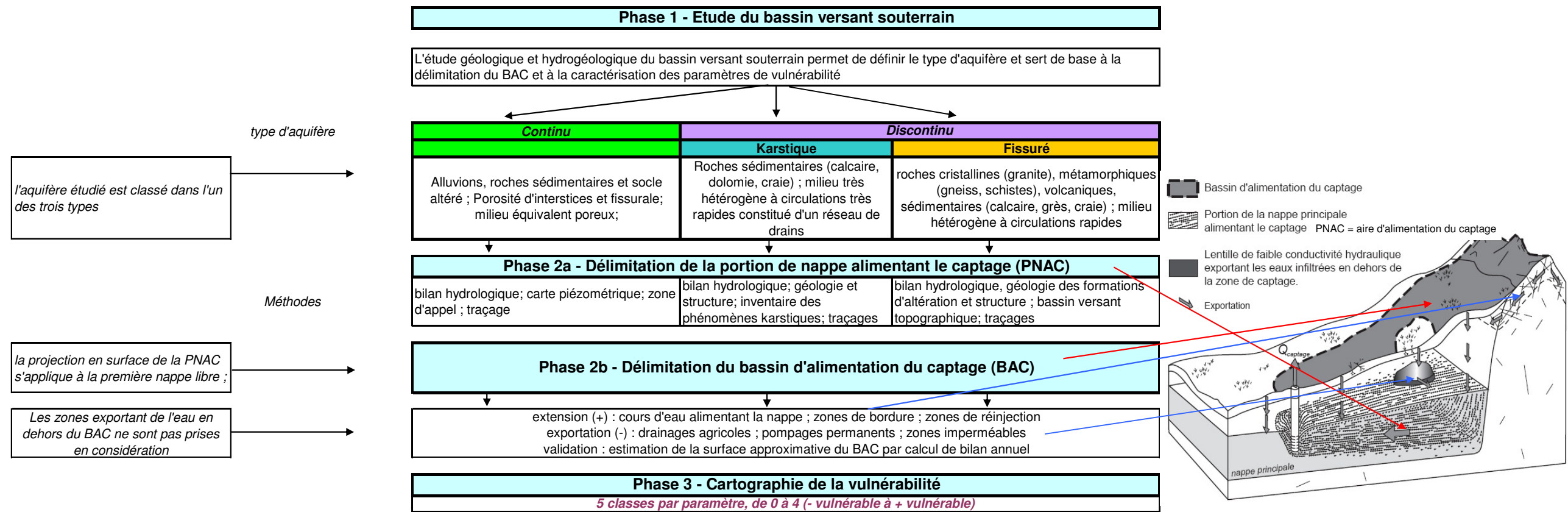
La méthode proposée, que ce soit pour la délimitation du BAC ou la cartographie de la vulnérabilité, dépend du type d'aquifère. Trois types ont été définis :

- Aquifère continu
- Aquifère discontinu fissuré
- Aquifère discontinu karstique

Il est donc primordial de savoir à quel type d'aquifère on a affaire. Ce choix va impacter les données à prendre en compte, la manière d'appréhender la structure et le fonctionnement du système et le cas échéant le coût des études. Le chapitre suivant explique comment choisir le type de système et donc la méthode à appliquer. Dans le cas où on a des aquifères de type différent (par exemple un aquifère karstique alimentant une nappe alluviale), il faut différencier la portion du BAC correspondant à chaque aquifère et combiner les méthodes correspondant aux deux types d'aquifère.

Le tableau de la page suivante détaille l'ensemble de la démarche.

Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses



	Continu	Discontinu	Fissuré
<b>Pondération linéaire (somme des poids=1)</b> <i>méthode existante</i>	Vulnérabilité = 0,1 P + 0,25 S + 0,3 IDPR + 0,2 H + 0,15 K <i>adapté de DRASTIC</i>	Vulnérabilité = 0,3 R + 0,5 I + 0,1 P(S,E) + 0,1 K <i>adapté de RISK modifié</i>	Vulnérabilité = 0,5 D + 0,3 IDPR + 0,2 S <i>adapté de DISCO</i>

Paramètres	Continu		Discontinu		Fissuré	
	Critère à évaluer	Eléments à prendre en compte	Critère à évaluer	Eléments à prendre en compte	Critère à évaluer	Eléments à prendre en compte
nature du sol et formations superficielles (couverture protectrice)	<b>S (Sol)</b>	épaisseur, texture, pierrosité	<b>S (Sol)</b>	épaisseur, texture, pierrosité	<b>S (Sol)</b>	épaisseur, texture, pierrosité
Pluie efficace	<b>P (pluie efficace)</b>	Pluie, ETP, RU* en mm/an spatialisée si possible				
Capacité d'infiltration du milieu (par rapport à sa capacité de ruissellement)	<b>T (topographie)</b>	zones d'infiltration en fonction de la pente, échange nappe/rivière; pertes locales	<b>I (infiltration)</b>	zones d'infiltration en fonction de la pente, infiltration ponctuelle en fonction des pertes et bassin versant, drainage, et dolines, vallées sèches	<b>R (ruissellement)</b>	bassins versants locaux alimentant par ruissellement les zones vulnérables
	<b>ZNS (zone non saturée)</b>				nature lithologique	
épaisseur de la zone non saturée	<b>H (hauteur piézométrique)</b>	isopièzes, MNT				
perméabilité de l'aquifère (conditionne la vitesse de migration d'un polluant)	<b>K (perméabilité)</b>	mesures de perméabilité (essais de débit) ou à défaut nature de la roche aquifère	<b>R (roche)</b>	nature : du plus marneux vers le plus karstifié	<b>D (discontinuités)</b>	rapidité de la liaison entre les discontinuités et le captage (perméabilité de fissures)
Degré de karstification			<b>K (karstification)</b>	d'unaire non fonctionnel à binaire fonctionnel		
Epikarst			<b>E (épikarst)</b>	épikarst pour son rôle de retard à l'infiltration, pris en compte uniquement si indentifiable et sélection par défaut (le + vulnérable) en comparant avec S		

\* ETP : Evapotranspiration Potentielle ; RU Réserve Utile

\*\* l'IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) permet de calculer le rapport infiltration / ruissellement par une méthode indirecte prenant en compte la pente et la nature des terrains situés au dessus de la première nappe





**L'étude géologique et hydrogéologique** sert de base à la délimitation du bassin d'alimentation du captage, aux conditions d'écoulement à la caractérisation de la vulnérabilité. Parmi les éléments à prendre en compte, indiqués ci-après, il conviendra de sélectionner ceux adaptés au type d'aquifère et au contexte du captage

<b>Contexte géologique</b>	Cadre géologique (stratigraphie, lithologie, structure,...).
	Coupes géologiques interprétatives.
<b>Contexte du captage</b>	Coupe géologique et technique de l'ouvrages
	Description de l'ouvrage : profondeur, état (en particulier, problèmes de colmatage), niveau piézométrique
	Inventaire des ouvrages situés sur le bassin (en particulier ceux susceptibles de contaminer directement le captage indépendamment de sa vulnérabilité intrinsèque)
<b>Contexte hydrogéologique</b>	Aquifère concerné.
	Etendue, limites horizontales et verticales, affleurement, épaisseur, niveaux producteurs.
	Profil hydrogéologique du secteur.
	Type de nappe (libre ou captive).
	Type de perméabilité, isotropie des formations géologiques.
	Conditions de recharge (pluie, pluie efficace, affleurements, failles,...). recherche de zones d'infiltration préférentielles
	Modifications anthropiques des conditions naturelles de recharge (canaux, irrigation, bassins d'infiltration, bassins de stockage, exutoires de drainages agricoles ...)
	Piézométrie régionale, piézométrie locale synchrone (hautes eaux eaux et basses eaux), fluctuations piézométriques.
	Sens et vitesse d'écoulement.
	Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité, porosité efficace, coefficient d'emménagement), gradient hydraulique, drainance.
	Résultats d'essai (traçage, pompage, perméabilité, diagraphies,...).
	Chronique de débits (pour une source). Pour une source inconnue à capter, suivi à un pas de temps mensuel pendant un an et sa sensibilité aux orages.
	Limites de la zone d'appel du forage, ou de l'aire d'alimentation de la source.
	Relation avec les cours d'eau, distance, alimentation (pourcentage), colmatage,...
	Echanges avec d'autres aquifères.
Biseau salé (présence, stabilité,...)	
Rôle des failles.	
<b>Qualité de l'eau</b>	Historique synthétique des analyses réalisées (sur 5 ans environ, au minimum), pour les ouvrages en exploitation.
	Evolution et fluctuations de la qualité de l'eau, fluctuations hautes eaux / basses eaux, paramètres in situ
	Pour les sources, suivi du débit, de la conductivité et de la température en période de crue
	Interprétation (faciès, anomalies, indices d'infiltration ou de pollution).
	Mesure de contrôle de la qualité de l'eau (paramètres contrôlés, fréquence des mesures).
	Causes probables de pollution (si pollution il y a eu).
Cartes hydrochimiques (si elles existent).	
<b>Vulnérabilité de la ressource</b>	Cartes de vulnérabilité intrinsèques existantes.
	Nature et épaisseur des couches de protection et/ou de la zone non saturée.
	Localisation des zones d'affleurement
	Etudes et cartes agro-pédologiques.
	Risque d'inondation (hauteur, fréquence).
	Perméabilité des terrains superficiels (nature et résultats des essais).

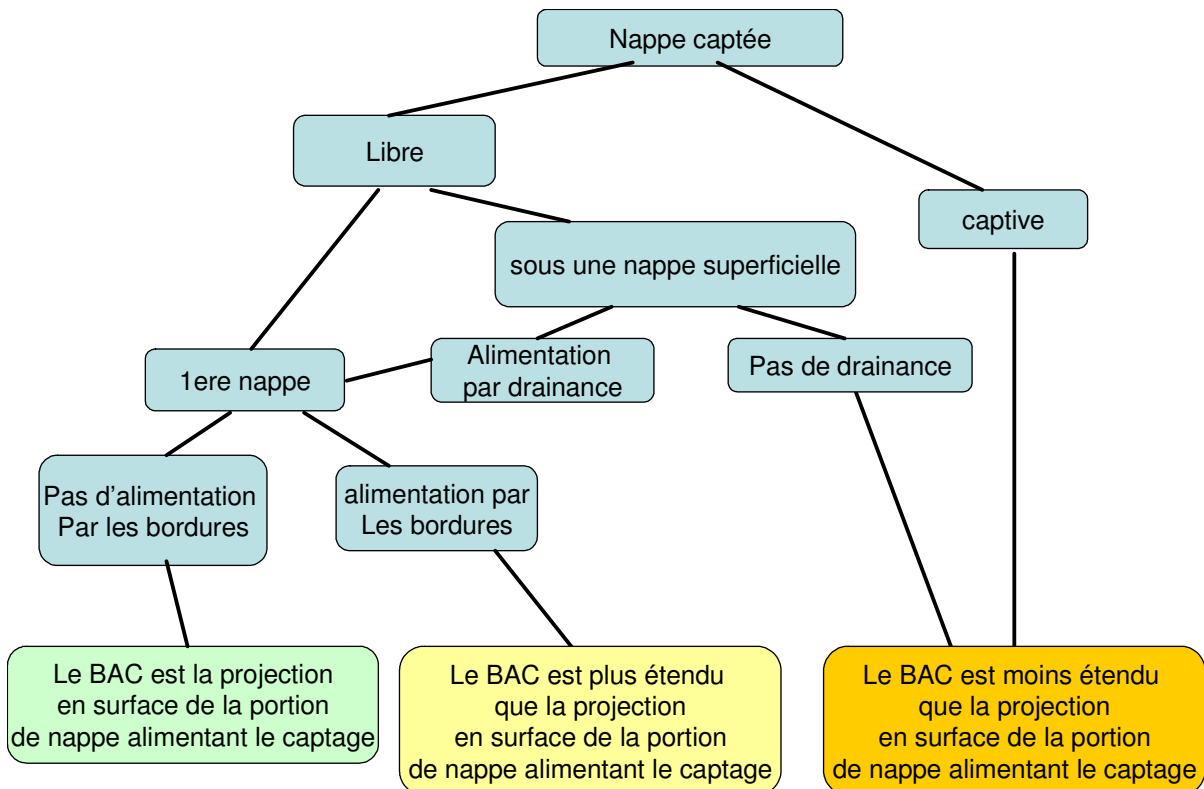
	Points d'absorption naturels ou artificiels (dolines, puits, pertes,...).
	Degré de colmatage des berges des cours d'eau.
	Réseaux de drainage agricole

**Pour la deuxième phase de l'étude**, il importe de distinguer la portion de nappe alimentant le captage (PNAC), du bassin d'alimentation du captage (BAC) (cf. définitions du chapitre 2). Dans les cas les plus simples, et sans doute les plus fréquents, la limite du bassin d'alimentation du captage sera la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage. Il existe deux cas où cette juxtaposition ne sera pas valable.

- L'ouvrage capte la première nappe, captive sous une formation imperméable
- L'ouvrage capte une nappe, libre ou captive, séparée de la surface par une ou plusieurs autres nappes

Enfin dans les cas où la nappe est alimentée par ses bordures, la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage sera étendue en intégrant ces bordures.

Ces différents cas sont schématisés comme suit



Pour une nappe libre, la portion de nappe alimentant le captage correspond, s'il s'agit d'une source, à son bassin versant souterrain<sup>3</sup>, s'il s'agit d'un forage, à ce qui est

<sup>3</sup> En supposant qu'il n'y a pas de cône de rabattement créées par des pompages en puits de reprise.

communément dénommé aire d'alimentation (Illustration 4). Dans le cas d'un aquifère continu, cette aire d'alimentation peut être calculée par des méthodes analytiques ou numériques. La limite amont de la PNAC correspond à la limite de partage des eaux souterraines (crête piézométrique). Dans le cas d'un système discontinu, la délimitation est faite à partir de sa structure géologique (faille, formation imperméable) et d'essais de traçage.

Quelle que soit la méthode employée pour délimiter l'aire d'alimentation du captage, il importe de prendre en compte l'incertitude sur les paramètres. Une analyse de sensibilité doit être réalisée, de préférence en utilisant la méthode de Monte-Carlo<sup>4</sup>.

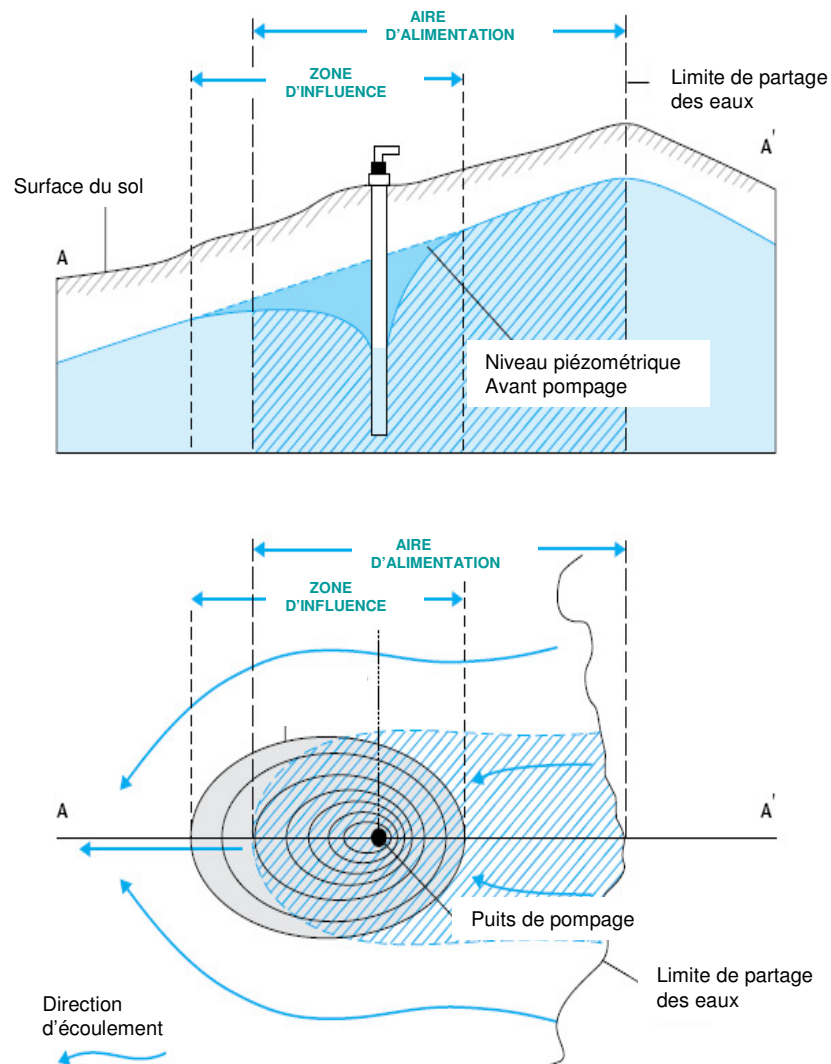


Illustration 4 – Distinction entre aire d'alimentation et zone d'influence

<sup>4</sup> La méthode de Monte Carlo vise à calculer une valeur numérique en utilisant des procédés aléatoires. Dans le cas qui nous intéresse, elle permet de générer des distributions aléatoires d'un paramètre, par exemple la perméabilité, entre deux valeurs mini et maxi fixées par l'utilisateur

Si les zones de bordure peuvent augmenter la surface du BAC, à l'inverse tout ce qui est susceptible de détourner l'eau à l'extérieur du BAC va réduire sa surface. Outre les zones imperméables évoquées précédemment, il s'agit de prendre en compte les drainages agricoles et les pompes permanents.

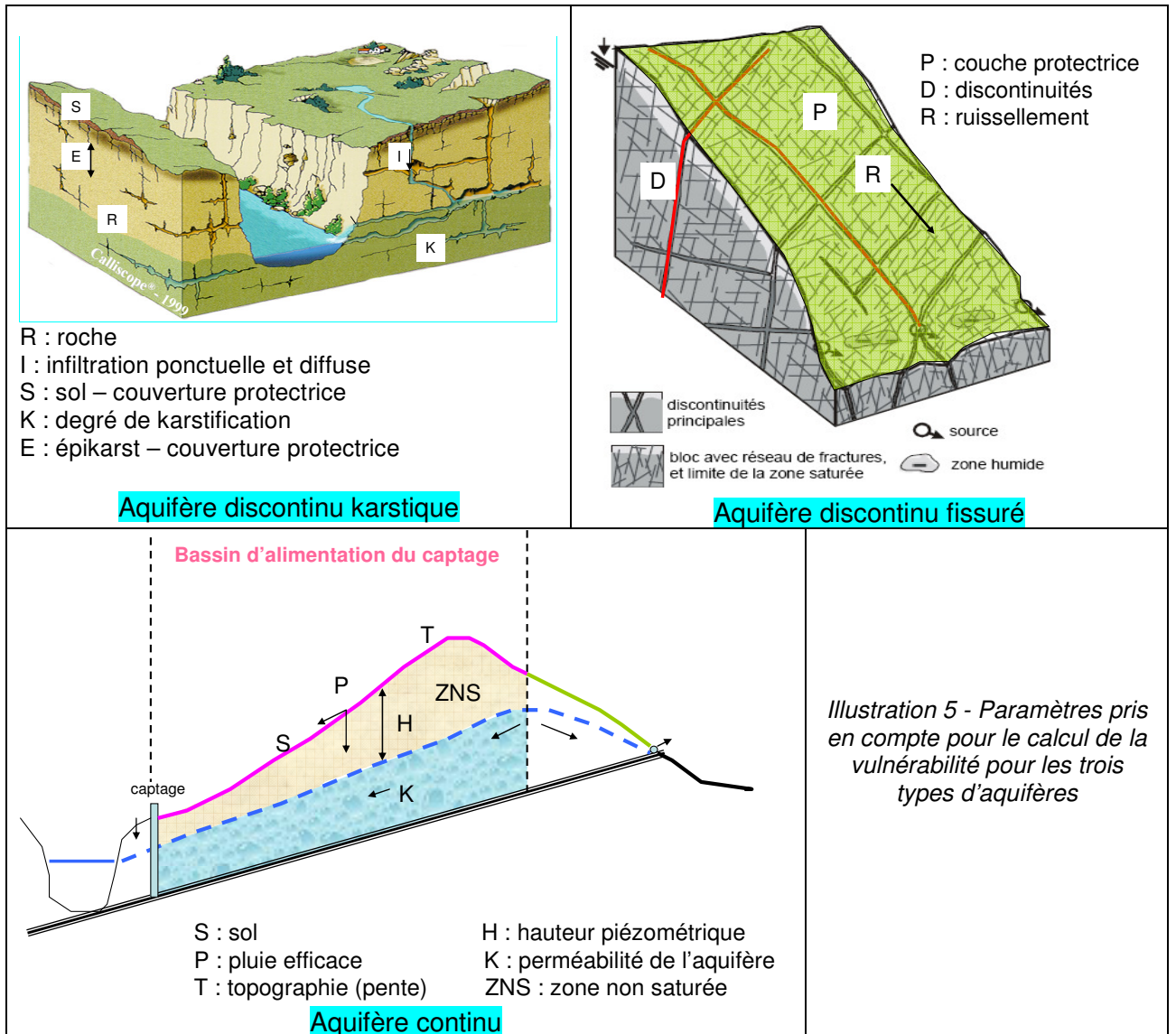
Enfin il importe d'assurer la cohérence entre la délimitation du BAC et la délimitation des périmètres de protection. Ces derniers, y compris le périmètre de protection éloigné, doivent être inclus dans le BAC.

**Pour la phase 3 de cartographie de la vulnérabilité**, les paramètres pris en compte varient selon la méthode choisie. La détermination de ces paramètres est explicitée dans les chapitres détaillant chaque méthode. Les illustrations suivantes replacent ces paramètres dans le schéma conceptuel des trois types d'aquifère. Ces paramètres ont été repris de méthodes existantes et adaptées à la problématique de la protection des captages vis-à-vis des pollutions diffuses. Nous proposons néanmoins de nous limiter dans un premier temps à la vulnérabilité intrinsèque ; nous sommes conscients du fait qu'un critère tel que la capacité de rétention des pesticides dans le sol, peut réduire notablement le transfert vers la nappe, mais ce critère dépend de trop nombreux paramètres et conduirait à mettre en œuvre une méthode soit trop complexe, soit risquant de déboucher sur des résultats entachés d'erreurs. La vulnérabilité intrinsèque vis-à-vis des pesticides devrait par contre pouvoir être prise en compte à l'issue du programme de recherche FOOTPRINT. Ce projet est en cours et vise à développer des outils afin d'évaluer le risque de contamination des eaux par les pesticides en prenant en compte le type de sol et le type de pesticides (cf. bibliographie). C'est également la raison pour laquelle nous n'avons pas pris en compte l'approche développée par le CORPEN, appliquée généralement à l'échelle régionale, parfois localement, et nécessitant une part importante d'expertise. Nous proposons d'adapter la méthodologie, dès la mise à disposition des outils issus de FOOTPRINT, prévue pour fin 2008.

La cartographie de la vulnérabilité est effectuée à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Les paramètres seront disponibles sous différents formats : rasters ou vecteurs (polygones, isolignes, points). Pour les vecteurs non polygonaux, l'information devra être spatialisée (interpolation des données ponctuelles ou sous forme d'isolignes, restitution statistique des valeurs ponctuelles sur des polygones – unités fonctionnelles – présentant un fonctionnement homogène). Le croisement des paramètres et la cartographie de la vulnérabilité seront effectués sous forme de grille. Le pas de cette grille est fonction de l'échelle des données utilisées.

***Avertissement : Les méthodes de caractérisation de la vulnérabilité proposées dans ce guide sont basées sur des méthodes existantes, mais aucune de ces méthodes n'est parfaite. Il convient d'insister sur le caractère empirique de la définition des paramètres de vulnérabilité, qui peuvent de ce fait être soumis à discussion. Ce guide pourra ainsi être mis à jour au vu de la confrontation des méthodes proposées aux réalités du terrain.***

Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses





## 4 Typologie du système aquifère

Une typologie du système aquifère est indispensable pour sélectionner la méthode de délimitation des BAC et la méthode adaptée de caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque du captage d'eau souterraine. Cette typologie est essentiellement basée sur l'hétérogénéité des aquifères (Illustration 6).

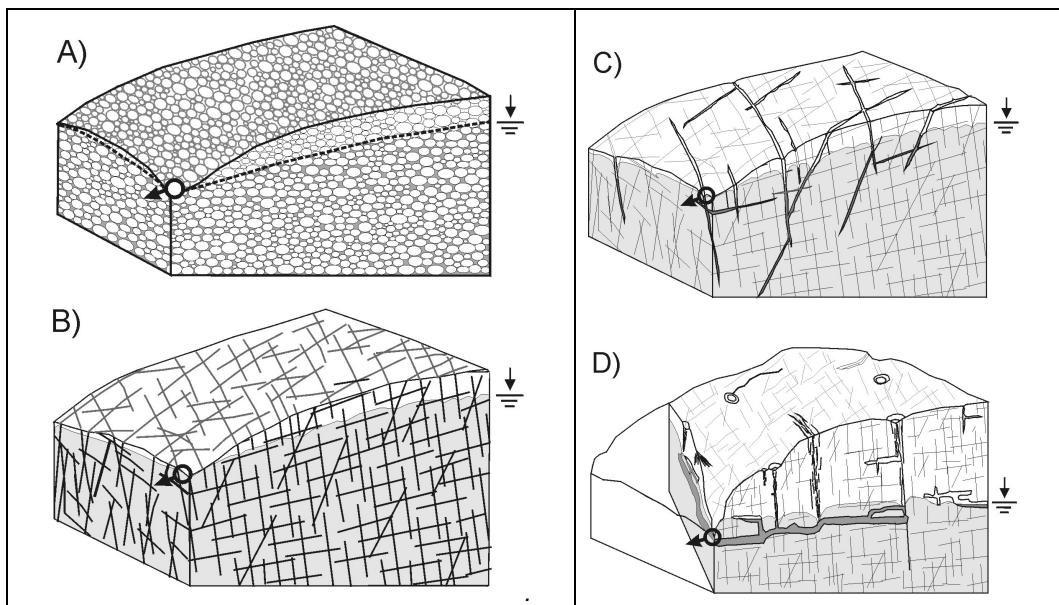


Illustration 6 - Représentation schématique de quatre aquifères caractérisés par une hétérogénéité croissante A) milieu poreux homogène B) milieu fissuré faiblement hétérogène C) milieu fissuré hétérogène D) milieu karstique (in Pochon & Zwahlen, 2003)

### 4.1 TYPES D'AQUIFERES

#### 4.1.1 Aquifère à porosité d'interstices

Un aquifère à porosité d'interstices est défini comme étant un milieu perméable comportant des pores interconnectés. Il peut s'agir d'un milieu constitué de sédiments meubles tels que, par exemple, des sables, graviers de différentes granulométries avec la présence de matériaux argileux et limoneux, ou encore de grès peu cimentés. Un tel aquifère est considéré comme un milieu continu par opposition au milieu discontinu, s'il possède des vides interconnectés dans le sens de l'écoulement souterrain. La porosité efficace ou le coefficient d'emmagasinement en nappe libre est comprise entre 5 et 35%. Elle est déterminée à partir des essais de pompage. Les vitesses de transit dans de telles formations sont de l'ordre du centimètre au mètre par jour. Le temps d'inertie de la nappe est important ; le temps d'effet de la recharge peut être supérieur au semestre et même à l'année.



**Remarque** : Si les lois générales de l'hydraulique (Loi de Darcy) ne s'appliquent qu'à des milieux continus isotropes et homogènes, elles sont appliquées également, en première approximation, aux milieux naturels même fissurés en prenant cependant soin de travailler à des échelles adéquates (la taille du volume élémentaire représentatif sera d'autant plus grande que la propriété observée (par ex. coefficient d'emménagement) présente une grande variation dans ses valeurs).

#### 4.1.2 Aquifère karstique

Un aquifère karstique comprend globalement deux zones se succédant sur une verticale :

- la **zone d'infiltration** : partie non saturée de l'aquifère, assurant l'écoulement des eaux d'infiltration au travers du massif, avec souvent un écoulement à composante horizontale prépondérante au niveau de l'épikarst, zone sous-cutanée de l'aquifère, d'une puissance de quelques mètres, pouvant jouer le rôle de zone de stockage temporaire.
- la **zone noyée** : elle se développe principalement à l'aval, sans nécessairement s'étendre à l'ensemble carbonaté ; on y distingue deux types de structure : (i) le réseau karstique constitué d'un ensemble organisé de drains, siège principal des écoulements au sein de la zone noyée et (ii) les blocs peu perméables encaissants le réseau de drains, siège d'écoulements lents.

L'aquifère karstique se distingue des aquifères poreux et des aquifères fissurés par le fait qu'il possède des vides de grandes dimensions, dans lesquels les eaux souterraines sont susceptibles de circuler très vite. Les dimensions des vides dans le karst couvrent une très large gamme de valeurs, depuis les fissures d'ouverture micrométrique et longues de plusieurs mètres jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres. De même, les vitesses d'écoulement souterrain vont de moins de quelques centimètres par heure à plusieurs centaines de mètres par heure. De ce fait, dans les aquifères karstiques fonctionnels, la très grande majorité des eaux séjourne moins d'un cycle hydrologique, et souvent seulement quelques jours à quelques semaines. Pour cette raison, toutes les caractéristiques physiques, chimiques et hydrauliques, présentent une très grande variabilité spatiale et temporelle.

L'aquifère karstique possède des modalités d'infiltration particulières qui n'existent pas dans les autres aquifères. Il existe en surface, sur quelques mètres d'épaisseur, une zone plus perméable du fait de l'altération : **la zone épikarstique ou épikarst**. L'épikarst rassemble l'eau d'infiltration dans une nappe perchée locale et discontinue, drainée vers le bas soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides de petites dimensions, en une infiltration lente écoulant un mélange d'air et d'eau. Par ailleurs, au contact de formations imperméables et du calcaire, des pertes absorbent les écoulements de surface et constituent une alimentation directe par ruissellement à fort débit de la zone noyée.

Par conséquent, lorsque des écoulements de surface contribuent à l'alimentation de la zone noyée à partir de pertes, l'aquifère karstique au sens strict n'est qu'une partie du système karstique, puisque ce dernier est alors constitué de l'aquifère proprement dit et du bassin de surface drainé par des pertes. On distingue donc (Illustration 7) :

- les systèmes karstiques unaires (système karstique = aquifère karstique),
- les systèmes karstiques binaires (système karstique = aquifère karstique + bassin de surface drainé par des pertes).

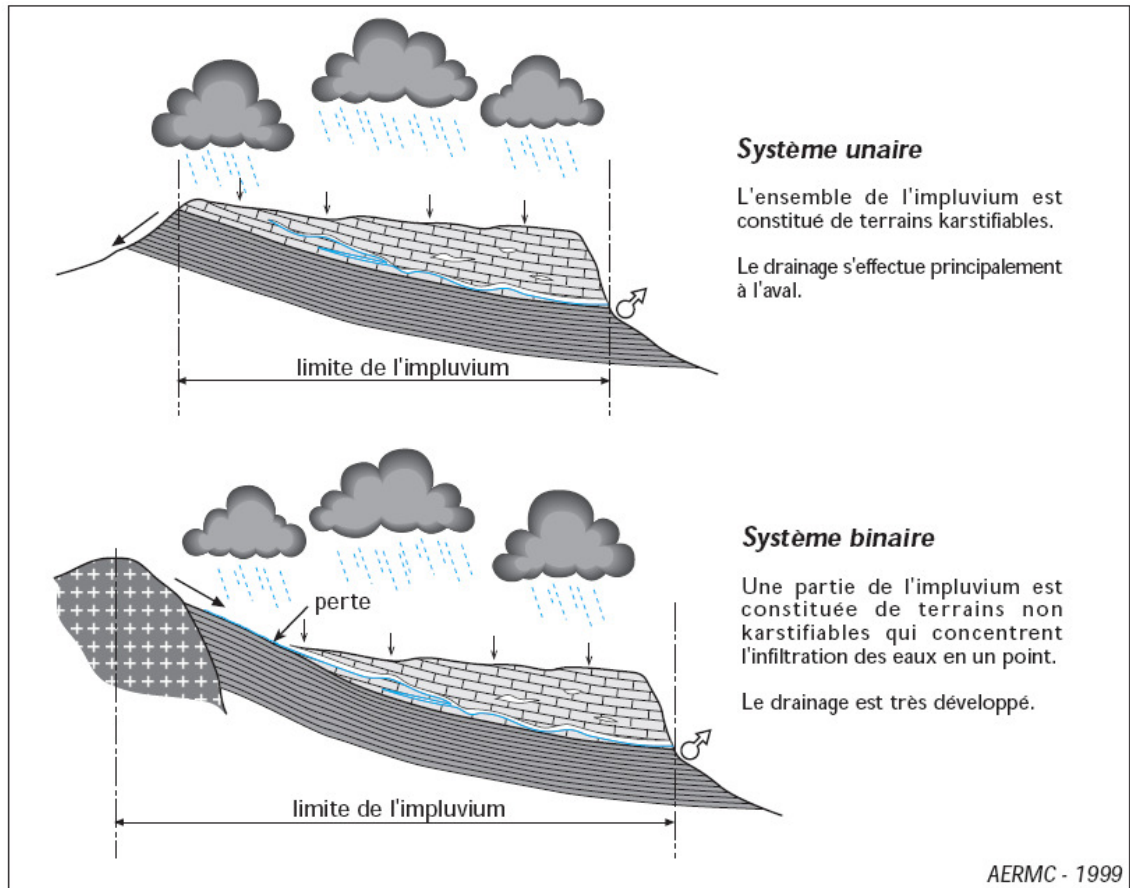


Illustration 7 – Les deux types de systèmes karstiques (in AERMC, 1999)

### 4.1.3 Aquifère karstique de la craie

Les aquifères qui se développent au sein de la craie, peuvent être en fonction du développement de la karstification et de l'évolution du niveau de base, considérés comme des aquifères karstiques ou comme des aquifères de type milieu fissuré. Le milieu aquifère à savoir la craie se démarque des autres formations carbonatées de par sa texture fine et par sa porosité. La craie constitue un milieu à double porosité primaire très capacitif permettant la constitution de réserves importantes. La fissuration et la fracturation importante de la craie induisent une porosité de fracture qui se traduit par des valeurs de perméabilités hydrauliques non négligeables :  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  m/s.

Lorsque la craie est karstifiée, des conduits verticaux et horizontaux prennent place permettant le transfert rapide des eaux d'infiltration, notamment concentrées au niveau des « bétoires ». L'aquifère de la craie peut être considéré comme un milieu à double voire triple porosité : matricielle à écoulement lent (écoulement pluriannuel), fissurale (recharge annuelle) et karstique (recharge directe en quelques heures via les pertes). Si l'aquifère de la craie est karstifié, ses caractéristiques sont les mêmes que celles présentées dans le paragraphe ci-dessus, concernant les aquifères karstiques (domination des écoulements au sein de réseaux karstiques connectés à une matrice rocheuse fissurée).

La caractéristique principale des aquifères de la craie pour la partie occidentale du Bassin de Paris réside dans la présence de formations de recouvrements datant du Tertiaire et du Quaternaire ; ces formations sont quasi inexistantes sur la partie orientale du Bassin de Paris. Les formations superficielles sont à prendre en considération pour les aquifères de type craie sous couverture. Elles ont joué un rôle prépondérant dans le développement de la karstification sous jacente. Ces formations sont soit des dépôts sableux, soit des argiles à silex, soit encore de la craie altérée. De plus, la nature de la perméabilité de ces formations va influencer le type de recharge de l'aquifère. Deux types de formations superficielles sus-jacentes à la craie aquifère sont envisagés :

- les formations superficielles présentent une perméabilité hydraulique en grand du type des sables ; l'eau d'infiltration arrive de manière diffuse au toit de la craie et la dissolution prend place de manière homogène sur toute la surface, les hétérogénéités étant liées à la présence de fractures ;
- les formations superficielles sont globalement imperméables : soit le toit de la craie est protégé par les formations de recouvrement et ainsi « fossilisé », soit dans le cas d'une hétérogénéité spatiale des formations, des points préférentiels d'engouffrement des eaux provoquent des dissolutions de la craie ; la dissolution serait davantage contrôlée par la nature de la couverture que par la fracturation. Les entonnoirs de dissolution sont ainsi les racines du manteau d'altération de la craie et constituent les bétoires naturelles.

#### **4.1.4 Aquifère fissuré**

Les aquifères de type milieu fissuré comprennent les "aquifères de socle", constitués de roches cristallines, d'origine plutonique (granites s.l.) et métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes, etc.), mais également les aquifères qui se développent dans des formations sédimentaires de type grès fissurés, calcaires et craies fissurés et non karstifiés.

Dans les aquifères fissurés ou dits à porosité de fissure, l'écoulement des eaux souterraines s'effectue de manière préférentielle et prépondérante le long des fractures, diaclases, failles, voire au niveau de limites de bancs. De manière générale, le modèle conceptuel suivant peut être proposé (Pochon & Zwahlen, 2003) : (i) présence d'un réseau de discontinuités principales caractérisées par des perméabilités élevées, jouant le rôle de transfert d'eau et de drainage vers les zones d'exutoire ; (ii)

le reste du massif peut être considéré comme relativement homogène, caractérisé par une porosité d'interstice (dans le cas de grès, voire de craie) ou de fissures et se traduisant par une perméabilité moindre ; ces volumes de roches assurent la fonction capacitive de l'aquifère ; (iii) la recharge de l'aquifère s'effectue aussi bien au niveau des discontinuités principales qu'au niveau de la roche fissurée moins perméable et (iv) finalement, l'eau captée dans la zone de décharge ou d'exutoire résulte d'un mélange d'eau ayant transité plus ou moins rapidement à travers les discontinuités principales (« eau jeune ») et plus lentement (drainage des discontinuités principales vers les blocs fissurés moins perméables (« eau ancienne »)).

De manière plus spécifique, l'aquifère de socle peut être défini comme suit, avec de haut en bas : (i) parfois une cuirasse ferrugineuse ou bauxitique d'épaisseur métrique, (ii) des altérites meubles résultant de l'altération de la roche originelle, caractérisées par une conductivité hydraulique relativement faible et des capacités de stockage des eaux souterraines significatives, (iii) un horizon fissuré stratiforme de 50 à 100 m d'épaisseur, auquel l'aquifère de socle doit sa perméabilité ; l'épaisseur de l'horizon fissuré est environ le double de celle des altérites meubles du profil d'altération (avant érosion). Les propriétés hydrodynamiques au sein des granites sont liées à la présence de fractures subhorizontales qui présentent une perméabilité suffisante permettant des « venues d'eau » significatives. D'une perméabilité proche de  $10^{-4}$  m/s, leur extension latérale est comprise entre 5 et 40 m environ. Des joints sub-verticaux, d'une perméabilité 10 fois moindre en moyenne, contribuent à la connexion du réseau. L'ensemble des autres fractures est à l'origine d'une « perméabilité de blocs », voisine de  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s, significativement plus forte que la perméabilité de la matrice ( $10^{-14}$  à  $10^{-9}$  m/s). Ces blocs assurent 90 % du stockage de l'eau dans l'horizon fissuré. (iv) Le substratum rocheux sain sous-jacent ne présente des perméabilités significatives que très localement et n'offre qu'une très faible capacité d'emménagement.

## 4.2 CARACTERISATION DU SYSTEME

### Le système aquifère est-il CONTINU ou DISCONTINU ?

La caractérisation de la typologie des systèmes aquifères est résumée à l'aide du tableau de l'illustration 9. Cette caractérisation est subdivisée en quatre parties, à savoir une phase d'identification géologique et une phase de caractérisation hydrogéologique elle-même subdivisée en 3 parties.

La première consiste sur la base de la géologie (cartes, base de données du sous-sol, études géophysiques), à déterminer le **contexte lithologique de l'aquifère**.

Si les formations sont de type **sédimentaire meuble** (ex. en milieu alluvial), le système sera dans la plupart des cas considéré *de facto* comme continu. Si les formations sont de type carbonaté ou de socle ou encore de grès fissuré, les éléments de la phase suivante doivent être vérifiés afin de déterminer si le milieu peut être considéré comme CONTINU ou DISCONTINU.

Les méthodes pour distinguer un système CONTINU d'un système aquifère DISCONTINU reposent notamment sur des critères simples d'évaluation relatifs au **fonctionnement hydrodynamique**, vis-à-vis de la recharge par exemple ou encore sur l'interprétation d'une ou plusieurs cartes piézométriques.

Un système continu est caractérisé par une certaine inertie, l'effet des précipitations sur les variations piézométriques peut se manifester au bout de plusieurs mois. Si les valeurs de piézométrie sur un nombre d'ouvrages significatifs par rapport au BAC permettent de représenter en considérant l'effet topographique, des relations eau de surface-eaux souterraines par ex., et que les variations naturelles du niveau piézométrique ne présentent pas de brusques variations au cours du temps (variation de charge journalière inférieure à quelques dizaines de cm et variation saisonnière de l'ordre de 1 à 10 mètres (Illustration 8), le milieu peut être considéré comme CONTINU. Dans certains cas cependant, les fluctuations piézométriques dans un milieu continu peuvent se manifester de manière plus brusque. Les nappes alluviales, alimentées par les cours d'eau, peuvent réagir rapidement (une semaine). Les systèmes captifs réagissent également plus promptement car leur coefficient d'emménagement faible confère à certains systèmes hydrodynamiques continus une diffusivité élevée se traduisant par une transmission rapide de l'onde de pression induite par une recharge brusque.

Si les formations sont **carbonatées**, mais que le système est de type karstique non fonctionnel, une approche de milieu continu peut être envisagée. L'aquifère karstique non fonctionnel est un aquifère karstique qui a été soumis à des modifications de la position de son niveau de base. Ainsi, son réseau de drainage est complètement ennoyé, la direction des écoulements souterrains a été modifiée depuis son initiation, résultant d'une transgression marine ou d'un alluvionnement externe bloquant l'ancienne émergence. Ce type d'aquifère possède souvent d'importante capacité de stockage et présente une continuité hydraulique. La continuité hydraulique peut être mise en évidence à l'aide de mesures en continu dans des piézomètres sur la zone d'étude. Dans ce cas, les fluctuations piézométriques ne sont, de manière générale, pas très importantes (Illustration 8) et les différences entre des cartes piézométriques en conditions hydrologiques contrastées sont significatives.

Dans le cas de formations aquifères **fissurées**, celles-ci peuvent être rattachées au milieu CONTINU, si par exemple les paramètres tels que le débit, ou les paramètres physico-chimiques sont caractérisés par une certaine stabilité suite à des événements pluvieux conséquents.

Dans le cas de formations **carbonatées**, il s'agit donc de caractériser l'aquifère karstique au sens strict, considéré comme milieu **DISCONTINU** des aquifères carbonatés fissurés. Un aquifère karstique au sens strict est caractérisé par son fonctionnement qui est déterminé par la structure des vides du réseau de drainage souterrain. Les effets de cette organisation sur le fonctionnement du milieu sont la séparation des fonctions transmissives (au niveau des conduits) et capacitatives (au niveau de la matrice rocheuse fissurée et système annexe au drainage - grandes cavités), l'existence de très forts contrastes de perméabilité, responsables de discontinuités hydrauliques et donc d'une variabilité temporelle et spatiale des

paramètres physiques importantes. Les cartes piézométriques ne fournissent pas une réelle information sur l'organisation des écoulements même en augmentant la densité des points d'observation. La loi de Darcy n'est pas valide en tout point de l'aquifère. Le système est caractérisé au niveau des sources par des réponses rapides lors d'événements pluvieux et des variations de grande amplitude des paramètres physico-chimiques. Au niveau des forages, les variations piézométriques enregistrées à un pas de temps inférieur à l'heure, montrent des variations de plusieurs mètres par heure voire par jour (Illustration 8). Les mises en charge sont importantes (plusieurs dizaines de mètres). Les vitesses de transit sont importantes (pouvant atteindre quelques centaines de mètres/h), selon les conditions hydrologiques et la mise en œuvre des essais de traçage artificiels. La connaissance d'un aquifère karstique peut également être appréhendées par la méthode des analyses corrélatoires et spectrales (Mangin, 1984). Cette méthode permet une véritable caractérisation du système karstique et une comparaison des systèmes entre eux. Sa mise en œuvre n'est cependant pas indispensable pour une simple identification du type d'aquifère. C'est la raison pour laquelle elle n'est pas décrite ici.

Dans le cas de formations de **socle**, le caractère **discontinu** est mis en évidence à partir du débit des sources, de la variation des paramètres physico-chimiques, de l'hétérogénéité des vitesses d'écoulement au sein du bassin et de l'existence de zones préférentielles d'infiltration. Les altérites peuvent être considérées comme milieu continu si la zone fissurée n'est pas mise à contribution (cas fréquent pour les petites sources).

Enfin, il faut signaler que dans la nature, les milieux peuvent être à la fois discontinus et continus, même lorsqu'il ne s'agit pas de karst (milieux à doubles porosité ou milieux à perméabilités multiples). Dans l'approche du guide méthodologique, c'est le caractère le plus pénalisant qui doit être retenu. En termes de risque de pollution ponctuelle ce sera le caractère discontinu qu'il faudra considérer. En revanche, en termes de pollution diffuse, le caractère continu et l'inertie qui y est associée n'est pas à négliger (cas de pollutions « anciennes » qui apparaissent avec plusieurs années de délai, rémanence des contaminations dans la partie capacitive de l'aquifère, ...). Ces systèmes se traduisent par des fluctuations piézométriques à tendance saisonnières et pluriannuelles.

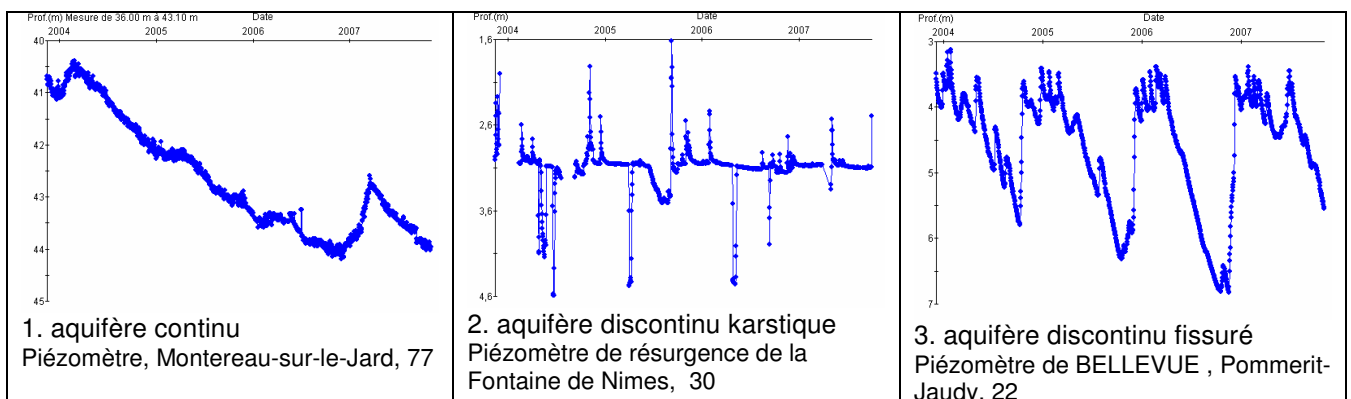


Illustration 8 – Exemple de fluctuations piézométriques (2004-2007) au fonction du type d'aquifère

Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

<b>formation</b>	roches sédimentaires, socle altéré	roches sédimentaires et métamorphiques, socle	roches sédimentaires
<b>lithologie</b>	calcaire, sables, grès, craie, arène granitique	calcaire, grès, craie, granite, schistes, gneiss	calcaire, dolomie, craie, calcaires marneux
<b>structure</b>	milieu poreux homogène ou fissuré homogène	milieu hétérogène : présence de discontinuités délimitant des blocs avec réseaux de fractures	structure karstique ; milieu très hétérogène : réseau de drainage souterrain
<b>géomorphologie</b>	absence de zones d'infiltration préférentielles	présence de zones d'infiltration préférentielle, d'érosion le long de fractures ou d'ouverture importante des systèmes de discontinuité	présences de zones d'infiltration préférentielles : dolines, gouffres, avens, pertes en rivières, bétoires
<b>taille du bassin versant souterrain</b>	variable ; pouvant atteindre plusieurs dizaines de km <sup>2</sup>	généralement de petite taille : quelques km <sup>2</sup>	variable ; pouvant atteindre plusieurs dizaines voire centaines de km <sup>2</sup>
<b>débit de production</b>	moyen à élevé : 30 à 200 m <sup>3</sup> /h	faible : < 5 m <sup>3</sup> /h	peut être très élevé : 1000 m <sup>3</sup> /h
<b>fluctuations de débit (source)</b>	faibles	fortes	très fortes, réponse impulsionnelle à un épisode pluvieux
<b>température</b>	stable	variations importantes au cours du cycle hydrologique	variations importantes au cours du cycle hydrologique
<b>conductivité</b>	stable	variations importantes au cours du cycle hydrologique	variations importantes au cours du cycle hydrologique
<b>hydrochimie</b>	stable	variations importantes au cours du cycle hydrologique	variations importantes au cours du cycle hydrologique
<b>turbidité</b>	rare	possible après fortes pluies	possible après fortes pluies
<b>surface piézométrique</b>	relativement plane	souvent corrélée à la surface topographique	
<b>variation du niveau piézométrique</b>	fluctuations annuelles faibles à moyennes	fluctuations annuelles faibles	hétérogène en fonction des vides recoupés; mise en charge rapide, plusieurs dizaines de mètres.
<b>infiltration</b>	lente	mixte : rapide au niveau des discontinuités principales et lente ailleurs	mixte : très rapide au niveau des pertes, ... et diffuse et lente ailleurs
<b>perméabilité</b>	variable mais généralement < 0.1 m/s	mixte : forte au niveau des fractures, faible ailleurs	
<b>porosité</b>	d'interstices ; comprise entre 5 et 30 %	double porosité : interstices et fractures ; porosité d'interstices très faible : < 5 %	double porosité : interstices et drains ; porosité d'interstices très faible : < 5 %
<b>vitesse de transit</b>	globalement faible : < 1 m / jour	importante ; de 1 m/j à 1 m/h	très importante : 10-50 m/h voir 100 m/h
<b>temps de transit entre le captage et les zones du BAC</b>	augmente globalement à mesure que l'on s'éloigne du captage	rapides : quelques jours à quelques heures ; n'augmente pas forcément à mesure que l'on s'éloigne du captage	très rapide : quelques heures
<b>essai de traçage</b>	dispersion du pic sur une longue période	taux de restitution élevé et pic peu dispersé dans le temps en fonction du degré de connexion hydraulique	taux de restitution élevé et pic peu dispersé dans le temps
<b>temps de séjour de l'eau dans l'aquifère</b>	peut être important sauf dans les alluvions	mélange d'eaux à temps de résidence court et long	court de manière générale, fonction de l'inertie du système (quelques jours à quelques mois)
			
	<b>continu</b>	<b>discontinu fissuré</b>	<b>discontinu karstique</b>

Illustration 9 – Tableau d'aide à la caractérisation des aquifères

## 5 Cas d'un système aquifère continu

### 5.1 ETUDE ET CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE

L'étude hydrogéologique préalable à la délimitation du BAC doit permettre de répondre à plusieurs questions :

- quelle est la nature du captage ? Si le captage est une source, quelles sont les limites de son bassin versant topographique ?
- quel type d'aquifère est capté par l'ouvrage (cf. chapitre 4) ? En particulier, quelle est l'inertie du système ?
- le système aquifère considéré est-il libre, semi-captif ou captif ?
- quelles sont les limites du bassin versant hydrogéologique à l'intérieur duquel se trouve le captage ?
- l'écoulement des eaux souterraines dans l'aquifère est-il unidirectionnel ? Si oui, peut-il être influencé par des pompages autres que celui du captage AEP considéré ?
- en cas de présence d'un cours d'eau, quelle est la nature de la relation nappe-rivière ? Le cas échéant, quelle est la part des eaux de surface dans les eaux pompées au niveau du captage ? ces aspects doivent être particulièrement pris en compte dans le cas d'un aquifère alluvial.
- des phénomènes de drainance peuvent-ils se produire et alimenter l'aquifère capté ?
- la protection naturelle de l'aquifère capté a-t-elle été modifiée par l'homme (forages mettant en communication des aquifères distincts, puisards agissant comme by-pass du sol et de la ZNS, décapage des sols...) ?

De façon plus générale, l'étude hydrogéologique doit permettre de faire le point sur les données disponibles et celles à acquérir (cf. chapitre 3, tableau des éléments à prendre en compte).

### 5.2 DELIMITATION DU BAC

La délimitation du BAC passe tout d'abord par la délimitation de la portion de nappe alimentant le captage (PNAC).



Celle-ci peut être approchée de quatre façons différentes, en fonction de la nature et de la complexité du milieu et de l'existence ou non d'une zone d'appel du captage :

1. le captage est une source et n'est pas soumise à des circulations rapides (pas de zone d'appel) ;
2. la connaissance du système aquifère tend à montrer que l'écoulement suit une direction principale, sans écarts notables, notamment dus à des pompages dans l'aquifère (zone d'appel simple). Aucune rivière n'est drainée – naturellement ou artificiellement – par la nappe. A posteriori, on s'assure que la PNAC délimitée reste dans les limites latérales du bassin versant hydrogéologique.
3. l'écoulement dans l'aquifère ne suit pas une direction principale ou des pompages influent sur cet écoulement ou bien l'on sort du bassin versant hydrogéologique ou la nappe draine un cours d'eau sans en modifier la hauteur d'eau. L'aquifère peut être modélisé par un système monocouche à nappe libre.
4. la modélisation des écoulements dans l'aquifère nécessite la prise en compte d'un système multicouche, le cas échéant à nappe captive ou semi-captive ou avec intervention de drainages à partir d'épentes ou encore avec des échanges nappe-rivière complexes (non modélisable par une charge imposée au niveau du cours d'eau).

La surface approximative du BAC peut être déterminée par un bilan hydrologique annuel (cf. 6.2). Elle est par définition très variable selon les contextes hydrogéologiques, de quelques hectares pour des sources en milieu de socle à plusieurs centaines de km<sup>2</sup> dans certains aquifères karstiques ou certains aquifères poreux des grands bassins sédimentaires.

### **5.2.1 Cas n°1 : le captage est une source**

Si le captage est une source, l'écoulement de l'eau dans l'aquifère n'est généralement pas ou peu artificialisé par un pompage ; il suit les gradients imposés par les charges piézométriques. S'il existe un pompage en puits de reprise induisant des modifications de l'écoulement naturel, on se place alors dans l'un des trois autres cas de figure.

La PNAC correspond alors au bassin versant hydrogéologique de la source, à tracer à partir d'une carte piézométrique d'échelle adaptée aux surfaces en jeu et aux possibilités de mesures piézométriques. En particulier, les cartes hydrogéologiques départementales à l'échelle du 1/100.000 ne peuvent être utilisées en l'état sur des bassins versants d'une dizaine de km<sup>2</sup>.

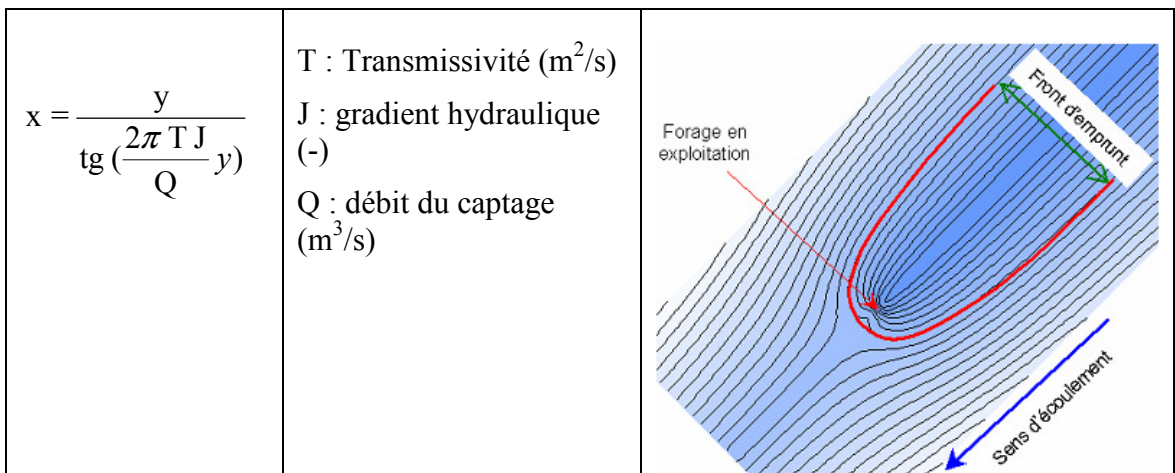
Le BAC sera déterminé selon les règles définies dans le chapitre 3, sous réserve que la source soit bien protégée des eaux de ruissellement. En cas contraire, le BAC devra intégrer le bassin versant topographique de la source.

Bien souvent, le captage de la source se fait via un puits de reprise : il convient donc de s'assurer que le volume du puits et le débit de la source permettent de fournir le volume prélevé durant le temps de pompage.

### 5.2.2 Cas n°2 : délimitation par approche analytique

Dans ce cas, l'écoulement des eaux souterraines suit une direction donnée, sans écart notable et sans drainage d'un cours d'eau.

La PNAC va être délimitée à partir d'une solution analytique permettant de déterminer la courbe enveloppe des lignes de courant atteignant le puits (zone d'appel). Cette courbe est fermée en amont par la crête piézométrique. L'équation de la courbe enveloppe est la suivante (voir détails dans Vernoux et al., 2007b) :



L'équation utilisée prend en compte le débit d'exploitation : on considérera l'exploitation journalière maximale. Dans cette approche, on a souvent une forte incertitude sur la transmissivité. Pour limiter cette incertitude, on peut faire le calcul avec une valeur minimum, une valeur moyenne et une valeur maximum de T et générer ainsi trois courbes enveloppes.

On peut également traiter cette incertitude par une approche stochastique. Pour cela, on va générer de façon aléatoire un certain nombre de valeurs de T (plusieurs milliers) entre des bornes fixées par l'étude hydrogéologique. La limite de l'extension de la PNAC sera obtenue de façon statistique, sous la forme d'une extension minimale, puis d'une probabilité de non dépassement de la courbe enveloppe fixée à 25%, 50% et pour la plus grande à 75%.

Un outil développé sous Excel dans le cadre de cette étude est présenté dans le chapitre 9 de ce guide. Les équations analytiques fixant le captage en un point de coordonnées (0,0), les résultats obtenus sont à reporter ensuite dans un SIG. A cet effet, l'outil fournit – dans le système de projection Lambert métrique dans lequel sont connues les coordonnées du captage – les coordonnées des points des courbes

enveloppes. On s'assure a posteriori que l'extension obtenue pour la PNAC n'inclut pas des captages susceptibles d'influencer les écoulements et ne sort pas des limites latérales du bassin hydrogéologique. Si tel était le cas, il serait alors nécessaire d'utiliser un modèle maillé.

Le BAC est ensuite déterminé selon les règles fixées au chapitre 3.

### **5.2.3 Cas n°3 : délimitation par modélisation maillée simple**

Dans cette approche, l'aquifère peut être représenté par un système monocouche à nappe libre. Des variations latérales de perméabilité peuvent exister.

Le système aquifère sollicité par le captage va être modélisé à l'aide d'un logiciel permettant de réaliser une représentation maillée du domaine. La modélisation – en régime permanent – reposera sur le calage d'une carte piézométrique synchrone dont l'échelle est adaptée à la taille du BAC. On vérifiera les conditions de réalisation de la carte pour représenter au mieux la situation piézométrique : la carte a-t-elle été dressée en tenant compte des pompages ou en dehors de toute influence anthropique ?

En cas d'échange avec un cours d'eau, ce dernier sera représenté par un potentiel imposé, ce qui signifie en première approximation que le débit drainé par la nappe est négligeable devant le débit du cours d'eau.

Après calage, l'extension de la zone d'appel est déterminée par la mise en œuvre du pompage au niveau du captage.

Parmi les logiciels existants, il est par exemple possible d'utiliser ASMWIN (cf. chapitre 9).

Le drainage de la rivière par la nappe ne signifiant pas systématiquement que l'eau captée au niveau de l'ouvrage provient pour partie de la rivière, il convient de le vérifier. Pour cela, on s'appuiera dans un premier temps sur les lignes de courant générées par la modélisation. Une estimation de l'origine des eaux pompées devra aussi être effectuée à l'aide d'un autre traceur hydrochimique ou par défaut, par analyses isotopiques.

En fonction des résultats obtenus et de la taille du bassin versant, il conviendra d'intégrer ou non le bassin versant hydrologique dans le BAC. Dans le cas d'un petit bassin versant avec une forte contribution à l'alimentation de la nappe, le bassin versant hydrologique sera intégré au BAC. A l'inverse, il n'apparaît pas réaliste d'intégrer la totalité du bassin versant d'un grand cours d'eau (exemple d'un captage dans les alluvions de la Seine).

### **5.2.4 Cas n°4 : délimitation par modélisation maillée complexe**

Cette méthode s'applique aux cas qui n'ont pu être traités par les approches précédentes.

La complexité des systèmes susceptibles d'être rencontrés nécessite une approche au cas par cas.

Selon les cas, la modélisation devra prendre en compte des aspects plus ou moins complexes des écoulements souterrains. Des logiciels comme MARTHE ou MODFLOW pourront être utilisés (cf. chapitre 9).

Après délimitation de la PNAC par la modélisation, le BAC sera déterminé selon les règles fixées au chapitre 3.

## **5.3 CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE**

### **5.3.1 Choix de la méthode**

Les vecteurs de pollution diffuse, c'est-à-dire – du point de vue eaux souterraines – les nitrates et les produits phytosanitaires, ont des comportements très différents lors de leur migration dans le sol et le sous-sol (forte mobilité des nitrates, mobilité très variée des produits phytosanitaires ; dénitrification en milieu réduit, dégradation des produits phytosanitaires non ionisés favorisée par la présence de matière organique...). Il n'est donc pas possible de cartographier une vulnérabilité représentant l'ensemble de ces comportements.

La prise en compte de la nature des polluants dans la cartographie de la vulnérabilité suppose donc de dresser plusieurs cartes, prenant en compte les spécificités liées aux différentes espèces. Le sol est dans cette approche un élément moteur prépondérant.

A l'heure actuelle, les méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité peinent à trouver une unanimité des pédologues quant aux paramètres (ainsi qu'aux poids et bornes des classes associées) à prendre en compte (lithologie, teneur en cailloutis, épaisseur, réserve utile, battance, hydromorphie, rupture de perméabilité, taux d'argile, teneur en matière organique, capacité d'échange cationique...). Le projet de recherche européen FOOTPRINT (cf. bibliographie) a mis en avant ces difficultés et proposera – à son échéance, fin 2008 – des scénarios de flux de concentrations en sortie du sol basés sur plusieurs centaines de types de sol, une quinzaine de contextes climatiques, une trentaine de couverts végétaux et une centaine de molécules différentes. A l'aide d'un arbre de décision, ces scénarios pourront être utilisés à partir de n'importe quelle carte pédologique.

De fait, dans l'attente de cet outil, il est suggéré d'utiliser une vulnérabilité intrinsèque.

Par ailleurs, l'enjeu implicitement considéré n'est pas la ressource en eau souterraine en tant que telle, mais la qualité de l'eau pompée au niveau du captage d'eau potable. De fait, cela suppose que l'on prenne en compte l'écoulement de l'eau dans l'aquifère (la vulnérabilité doit prendre en compte la percolation de l'eau jusqu'à la nappe mais aussi sa circulation dans l'aquifère).

### 5.3.2 Paramètres pris en compte et classification

La vulnérabilité sera calculée comme la somme pondérée de plusieurs paramètres classifiés.

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

Avec  $D_i$  : index de vulnérabilité global d'une unité cartographique  
 $W_j$  : facteur de pondération du paramètre  $j$   
 $R_j$  : index du paramètre  $j$   
 $n$  : nombre de paramètres pris en compte

Ce choix correspond à la démarche la plus souvent utilisée dans la cartographie de la vulnérabilité (DRASTIC, SINTACS, RISK, EPIK...). Ceci étant, d'autres modes de calcul pourraient être envisagés, comme la multiplication de plusieurs critères. Ceci permettrait par exemple de représenter la vulnérabilité d'un système aquifère non comme étant le fruit de plusieurs facteurs mais comme étant la résultante de plusieurs couches protectrices dont les effets s'accumulent : la protection offerte par la ZNS viendrait par exemple s'ajouter à celle offerte par le sol.

Les paramètres pris en compte sont présentés ci-dessous.

**Pluie efficace, P.** Ce paramètre est à élaborer à partir de la pluviométrie, de l'évapotranspiration (ETP) et de la réserve utile (RU) des sols. Sa discrétisation à l'échelle d'un bassin d'alimentation de quelques km<sup>2</sup> paraît difficile à réaliser, notamment du point de vue de l'ETP et probablement aussi de la pluviométrie. L'existence d'une cartographie de la RU des sols semble être le facteur permettant le cas échéant de présenter des variations de la pluie efficace. En l'absence d'éléments permettant une discrétisation de la pluie efficace, on pourra considérer sa valeur constante sur l'ensemble de la zone et la calculer à partir des données disponibles aux stations Météo France les plus représentatives du secteur.

**Sol, S.** Ce paramètre prend en compte la couverture pédologique et son comportement hydrodynamique. Il est présenté dans l'approche karstique.

Les cartographies existantes sont notamment celles du programme IGCS du GIS Sol<sup>5</sup> :

- le Référentiel Régional Pédologique, qui prévoit de cartographier l'ensemble de la France au 1/250 000 ;
- le programme Connaissance Pédologique de France (CPF), qui vise à produire des cartographies au 1/50 000 ou au 1/100 000. A fin 2005 (information disponible à fin août 2007 sur le site du GISSOL), seule une faible part du territoire français était couverte.

L'échelle de ces cartographies (1/100 000 et 1/250 000 notamment) est peu adaptée à l'échelle des BAC de taille faible à moyenne. Pour ces BAC, il est donc fortement conseillé de réaliser une cartographie à partir de sondages sur le terrain. Pour les cas

---

<sup>5</sup> IGCS : Inventaire, Gestion et Conservation des Sols ; GIS : Groupement d'Intérêt scientifique - <http://gissol.oreans.inra.fr/programme/igcs/igcs.php>

de BAC très étendus, il est envisageable d'utiliser les cartes existantes, et de procéder à des vérifications à partir de prélèvements de contrôle.

**Infiltration efficace, I.** L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux, (IDPR) permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité intrinsèque des formations géologiques présentes en surface ou sub-surface à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie. L'indice est constitué par comparaison du réseau hydrographique existant avec un réseau hydrographique reconstitué à partir des pentes. Il inclut donc l'impact de la topographie dans la partition de la pluie efficace.

L'IDPR, disponible sous forme de grille sur le bassin Seine-Normandie (l'échelle de validité est le 1/50.000), est à utiliser sous une forme polygonale. A cet effet, on pourra utiliser les polygones de la carte géologique harmonisée au 1/50 000. Pour chacune des formations géologiques, une valeur médiane de l'IDPR sera calculée : cette valeur sera utilisée pour caractériser le paramètre.

L'intérêt de l'IDPR est qu'il existe sur l'ensemble de la France et qu'il permet de mettre en évidence des variations spatiales. Il reste que l'échelle de validité des cartes est le 1/100 000, au mieux le 1/50 000<sup>6</sup> ; cette méthode n'est donc valable que pour des grands bassins d'alimentation (plusieurs dizaines de km<sup>2</sup>) et plutôt adapté à des milieux continus, hors aquifères alluviaux. Dans le cas de petits bassins, deux approches doivent être privilégiées : (1) on considère que les variations spatiales de l'infiltration sont peu importantes et dans ce cas le critère « **infiltration** » n'est pas pris en compte dans la cartographie de la vulnérabilité ; (2) on considère que les variations spatiales de l'infiltration doivent être prises en compte et dans ce cas il faut découper le bassin d'alimentation en cellules d'infiltration efficace homogène puis calculer l'infiltration efficace de chaque cellule sur la base des caractéristiques propres de la cellule concernée. La mesure in-situ de l'infiltration efficace nécessitant un important dispositif de surveillance (cases lysimétriques) et demandant une longue période de mesure pour l'obtention de valeurs annuelles moyennes, l'infiltration efficace annuelle moyenne sera évaluée pour chaque cellule par l'équation du bilan hydrique : (pour les détails de la méthode, voir Bussard, 2005).

$$I_{e_i} = P_{b_i} - R_i - ETR_i \text{ [m/s]}$$

$I_{e_i}$  : Infiltration efficace moyenne sur la cellule i

$P_{b_i}$  : Précipitations brutes annuelles moyennes sur la cellule i [m/s].

$R_i$  : Ruissellement annuel moyen sur la cellule i [m/s].

$ETR_i$  : Evapotranspiration annuelle moyenne réelle sur la cellule i [m/s].

**Epaisseur de la zone non saturée, H.** Dans un milieu continu ou assimilé continu, la vulnérabilité de l'aquifère diminue avec la profondeur à laquelle il se trouve. L'épaisseur de la zone non saturée est calculée comme étant la distance entre la

---

<sup>6</sup> L'IDPR est calculé à partir de deux sources de données : le MNT et la BD CARTHAGE de l'IGN. Si le MNT est relativement précis (maille de 25 ou 50 m), l'échelle de référence de la BD CARTHAGE est le 1/50 000

surface du sol et le niveau de la nappe pour un aquifère libre. Dans un aquifère captif, c'est la distance entre la surface et le toit de l'aquifère qui est à considérer. Ceci étant, ce cas ne devrait pas être rencontré dans la mesure où une telle situation est une condition d'exclusion de la zone délimitée par le BAC.

En présence de plusieurs cartes piézométriques, on utilisera de préférence les cartes de « hautes eaux » qui fourniront la vision la plus pessimiste du degré de protection de l'aquifère du point de vue de ce paramètre. On prendra garde à s'assurer du réel caractère de « hautes eaux » de la carte utilisée : il s'agit de prendre en compte une situation interannuelle de hautes eaux et non une situation saisonnière (pour un aquifère classique, cette dernière situation apparaissant au printemps, chaque année).

**Perméabilité de l'aquifère, K.** Ce paramètre prend en compte la capacité de l'aquifère à laisser circuler l'eau. Ce paramètre est intégré dans la mesure où l'enjeu considéré est la qualité de l'eau pompée au niveau de l'ouvrage. De fait, cela suppose un écoulement dans l'aquifère (on ne s'intéresse donc pas uniquement à la capacité d'un polluant à atteindre la ressource). En l'absence de valeurs de perméabilité disponibles sur la zone d'étude, celles-ci pourront être évaluées à partir de gammes théoriques proposées dans des ouvrages généralistes d'hydrogéologie. L'objectif consiste avant tout à mettre en évidence des zones plus perméables que d'autres : on est donc essentiellement sur une approche relative. Les valeurs de perméabilité à privilégier sont celles issues des essais de pompage. Les perméabilités issues d'un modèle hydrodynamique sont à manier avec précaution car elles sont souvent utilisées comme paramètre de calage du modèle.

Cinq classes ont été retenues pour caractériser chacun des paramètres. Les valeurs attribuées à chacune des classes s'échelonnent de 0 – très favorable à la protection de l'aquifère – à 4 – très défavorable.

La classification des paramètres est présentée dans le tableau ci-dessous. La classification du paramètre S est décrite dans le chapitre 7 (aquifère karstique).

Valeur de l'indice	Pluies efficaces P (mm)	IDPR	Epaisseur ZNS H (m)	Perméabilité K (m/s)
4	> 300	0 - 400	< 2	$> 10^{-3}$
3	200 – 300	400 – 800	2 – 5	$10^{-4}$ - $10^{-3}$
2	100- 200	800 – 1200	5 – 20	$10^{-5}$ - $10^{-4}$
1	50 – 100	1200 - 1600	20 – 50	$10^{-7}$ - $10^{-5}$
0	< 50	1600 - 2000	> 50	$< 10^{-7}$

Dans le cas où l'infiltration ne peut être déterminée au moyen de l'IDPR, les classes de valeurs seront déterminées au cas par cas, sachant que l'infiltration moyenne en France est d'environ 150 à 300 mm par an.

### 5.3.3 Poids des paramètres et classes de vulnérabilité

La somme des poids est égale à 1. Ils sont présentés sous forme de pourcentage dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	Abrév.	Poids (%)
Pluie efficace	P	10
Sol	S	25
Infiltration (IDPR ou autres paramètres)	I	30
Epaisseur ZNS	H	20
Perméabilité de l'aquifère	K	15
Total		100

En se basant sur cette pondération, la formule de calcul est la suivante :

$$\text{Vulnérabilité} = 0,1 P + 0,25 S + 0,3 I + 0,2 H + 0,15 K$$

Les poids les plus forts sont attachés aux critères sol et infiltration ; c'est la capacité du milieu naturel à empêcher le polluant d'atteindre la nappe.

La valeur finale de vulnérabilité varie donc entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale).

Valeurs indice	Classe	Vulnérabilité
3,2 – 4	4	Très élevée
2,4 – 3,19	3	Elevée
1,6 – 2,39	2	Modérée
0,8 – 1,59	1	Faible
0 – 0,79	0	Très faible

*Classes de vulnérabilité*

En l'absence d'éléments permettant de cartographier un paramètre, un poids nul lui sera affecté et les autres poids seront recalculés au prorata de leur importance dans le calcul de la vulnérabilité.

### 5.3.4 Exemple d'application

La zone d'étude est située dans le secteur de la commune de Moulton, dans le Calvados. Le bassin versant hydrogéologique est dans l'aquifère des Calcaires du Bathonien. Les chroniques piézométriques, montrant des temps de demi-décroissance de plusieurs mois, ont permis de d'identifier le système aquifère comme continu.



## Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

La portion de nappe alimentant le captage a été déterminée à partir des caractéristiques hydrogéologiques du système et de simulations avec le logiciel ASWIN. A vu de l'incertitude sur la relation entre le Bathonien moyen (solicitée par l'ouvrage) et le Bathonien supérieur et de l'existence d'une réalimentation du Bathonien au travers des marnes et argiles Calloviennes, il convient de considérer l'ensemble du bassin versant hydrogéologique comme bassin d'alimentation du captage.

La carte de vulnérabilité a été établie à partir d'une carte des sols basée sur les données disponible dans le rapport du bureau d'étude, de la grille IDPR au pas de 50 mètres, de la carte piézométrique hautes eaux de l'atlas hydrogéologique du Calvados, des valeurs de perméabilité issues des essais de pompages (avec prise en compte de valeurs plus fortes en zones de vallée).

Cet exemple est présenté en détail dans le rapport BRGM/RP-55875-FR.

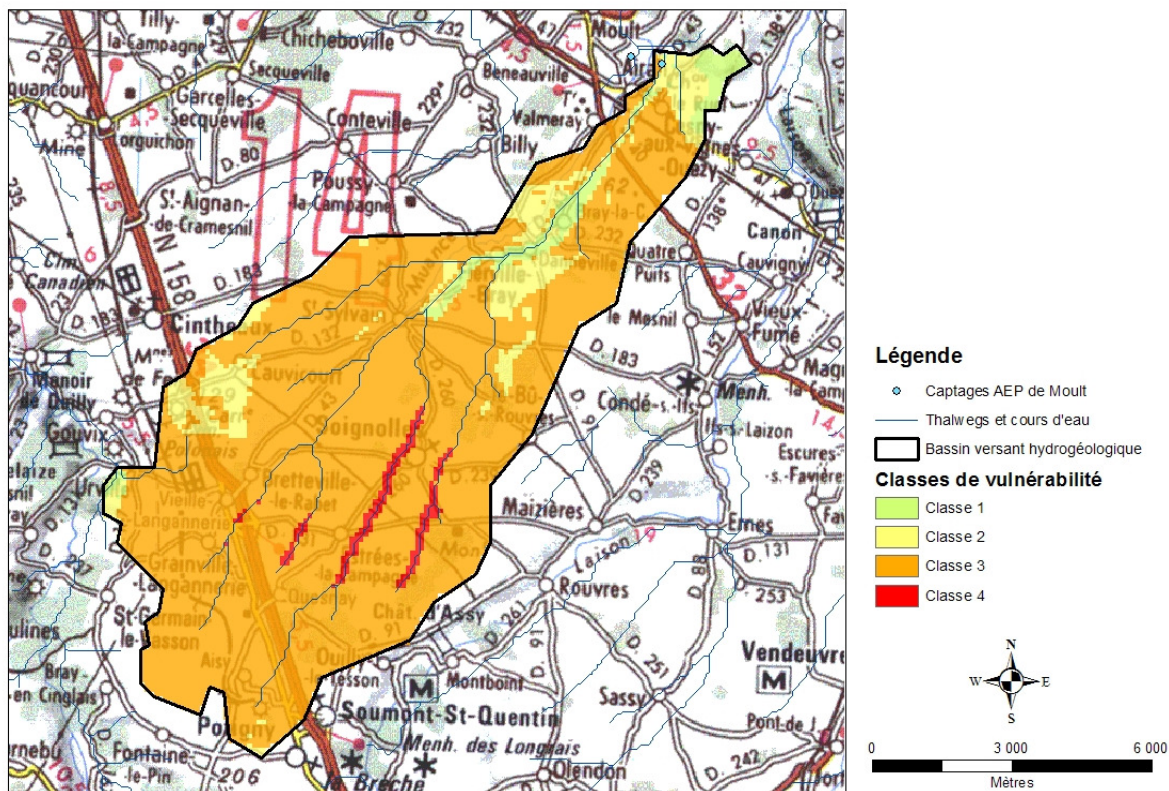


Illustration 10 - carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation du captage de Moulton

## 6 Cas d'un système aquifère discontinu fissuré

### 6.1 ETUDE ET CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE

L'étude hydrogéologique préalable à la délimitation du BAC doit permettre de répondre à plusieurs questions :

- Quelle est la nature du captage ? source ou forage ?
- Quelle est l'hétérogénéité du système aquifère à partir de l'analyse des variations temporelles des chroniques de débits ou de piézométrie, des paramètres physico-chimiques ?
- Quelle est la configuration du réseau de discontinuités ?
- En cas de présence d'un cours d'eau permanent ou temporaire, existe-t-il des indices et des preuves de zones d'infiltration préférentielle ?
- La protection naturelle de l'aquifère capté a-t-elle été modifiée par l'homme (puisards agissant comme by-pass du sol et de la ZNS, décapage des sols...) ?

De façon plus générale, l'étude hydrogéologique doit permettre de faire le point sur les données disponibles et sur celles qui doivent être acquises (cf. tableau du chapitre 3).

### 6.2 DELIMITATION DU BAC

La délimitation du BAC est réalisée d'une part à partir de la géologie (coupes transverses), de mises en évidence de connexions hydrauliques résultant d'essais de traçage artificiels. La superficie du BAC peut être approchée également par le calcul du bilan hydrologique annuel.

Il s'agit de déterminer dans un premier temps la lame d'eau infiltrée ( $I$  = infiltration efficace) sur la base de l'estimation des précipitations annuelles ( $P$  [mm]), de l'évapotranspiration ( $ETP$  [mm]) et du ruissellement ( $R$  [mm]). Le terme  $I$  est obtenu avec la résolution de l'équation suivante :  $I = P - ETR - R$ . Les sources d'information pour les différents termes sont d'une part les données de stations du réseau de Météo France, particulièrement pour  $P$  et  $ETR$ . L' $ETR$  peut également être calculé selon des formules empiriques (ex. Turc). Le terme  $R$  du ruissellement peut être obtenu à partir d'études hydrologiques et pédologiques de caractérisation du ruissellement, ainsi que par de l'observation de terrain (caractéristiques des sols, drainage agricole, ...).

La superficie du BAC est déterminée par le rapport du débit annuel du captage à la lame infiltrée. Les limites du bassin sont ensuite ajustées en fonctions des conditions

hydrogéologiques locales (topographie, structure géologique, présence d'autres résurgences, contribution à des systèmes d'écoulements plus profonds)

## 6.3 CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE

### 6.3.1 Choix de la méthode

La méthode DISCO, méthode multicritère a été développée pour les aquifères fissurés très hétérogènes exploités par des captages vulnérables, afin d'offrir une méthode d'aide pour la délimitation des périmètres de protection (Pochon & Zwahlen, 2003). Cette méthode a été retenue pour la caractérisation des BAC en milieu fissuré hétérogène, dont le comportement hydrogéologique traduit une vulnérabilité (réponses très marquées du captage en termes de débit et de paramètres physico-chimiques suite à des événements pluvieux).

La méthode a été adaptée afin d'assurer une cohérence dans les méthodes préconisées, notamment en termes de nombre de classes par paramètre et de l'ordre des indices vis-à-vis de l'intensité de la vulnérabilité.

### 6.3.2 Paramètres pris en compte et classification

La méthode de cartographie de la vulnérabilité pour les milieux fissurés hétérogènes repose sur la caractérisation de trois paramètres :

- **Discontinuités** qui caractérisent le transfert d'eau au sein de l'aquifère fissuré entre la zone d'infiltration et le captage,
- **Couverture protectrice - Sol** qui a pour effet de retarder ou de déplacer l'effet protecteur du sol et des couches géologiques au dessus de l'aquifère,
- **Infiltration / Ruissellement** comprenant tous les processus à la surface avant l'infiltration.

**Discontinuités, D.** Il s'agit d'identifier les zones caractérisées par des contrastes de conductivité hydraulique au sein de l'aquifère, se matérialisant par la présence de failles régionales, des zones plus ou moins fracturées, des fractures caractérisées par de plus ou moins grandes ouvertures. Il est nécessaire de déterminer à l'aide d'essais de traçage l'existence (ou l'absence) de connexion rapide entre le point d'injection au niveau d'une hétérogénéité de type faille et le captage.

Ce paramètre est subdivisé en 5 classes, de D0 à D4, du moins au plus vulnérable, comme suit :

- **D0**, Roche saine non altérée et non fracturée. Absence de connexion hydraulique avec le captage.

- **D1**, Secteur avec connexion hydraulique lente au captage (> 15 à 30 jours) mise en évidence par essais de traçage ; existence de phénomène d'atténuation (pic étalé de restitution du traceur). Secteur caractérisé par de faible conductivité hydraulique. Zone de fractures dans roche saine.
- **D2**, Secteur avec faible et lente connexion hydraulique au captage (environ 10 jours). Zone de conductivité hydraulique moyenne ou discontinuité sans connexion hydraulique rapide avec le captage : dans zone d'altération et dans zone fissurée.
- **D3**, Zone de discontinuités bien connectées au captage avec phénomène d'atténuation limité, testée par essais de traçage (réponse rapide et concentrée du pic, en quelques jours). Dans zone fissurée de l'aquifère, grandes fractures bien connectées avec le captage.
- **D4**, Zone de discontinuités connectées de manière rapide (environ 10 à 24 heures), pas de phénomène d'atténuation significatif.

La cartographie de ce paramètre s'effectue à l'échelle du BAC sur la base de données géologiques existantes, d'observations de terrain (lever de coupes lithologiques au niveau d'affleurement ; géomorphologie), d'analyse de photos aériennes et si nécessaires de profils géophysiques (tomographie électrique). Les caractéristiques des différents types de discontinuités peuvent être évaluées sur la base d'observations de terrain (fréquence, extension, ouverture, orientation, zones d'infiltration préférentielle) ainsi qu'à partir des résultats d'essais de traçage antérieurs ou à réaliser.

**Sol – couverture protectrice S.** Ce critère est cartographié selon les mêmes définitions et la même classification que celle proposée dans la méthode RIS(P)K pour les aquifères karstiques discontinus. La classification repose d'une part sur la distinction entre un sol sur roche saine ou un sol sur horizon géologique protecteur et sur la texture et le pourcentage de cailloux, sa nature ainsi que son épaisseur (tableau ci-dessous).

Exemple : si on considère un sol limoneux à faible pierrosité (moins de 15 % de cailloux), d'épaisseur supérieure à 100 cm recouvrant du calcaire grossier du Lutétien, le critère S sera déterminé de la manière suivante :

- Texture = 2 x pierrosité = 1 donne nature du sol = 1
- Epaisseur > 100 cm x sol sur horizon faiblement protecteur x nature du sol = 1 donne **indice = 1**

Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

		Texture			Nature du sol					
		1 (argile)	2 (limon)	3 (sable)	inconnue	1	2	3		
% cailloux	1 (0-15%)	1	1	2					Epaisseur	1 (>100cm)
	2 (15-60%)	1	2	3	2 (20-100 cm)	S2	S2	S3		S4
	3 (>60%)	2	3	3	3 (0-20cm)	S3	S3	S4		S4
				4 nulle	S4	S4	S4	S4		

Le tableau suivant donne la classification des sols.

Caractéristiques				Caractéristiques				Indice
Sol sur matrice nue ou avec un horizon géologique faiblement protecteur (éboulis, alluvions)				Sol sur horizon géologique important de faible conductivité hydraulique (argiles, argiles marneuses, conglomérats et brèches massifs)				
Nature du sol inconnue	Nature de sol connue			Nature du sol inconnue	Nature de sol connue			0
	1	2	3		1	2	3	
	-	-	-	Couverture protectrice > 5m (avec sol ou non)				0
Epaisseur > 100cm	Epaisseur > 100cm	-	-	Couverture protectrice 1-5m ou > 1m avec un sol de texture inconnue ou de type 1 > 20cm				1
Epaisseur 20-100cm	Epaisseur 20-100cm	Epaisseur > 100cm	-	Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 20-100cm	-	2
Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 20-100cm	Epaisseur > 100cm	Absence totale de sol	Absence totale de sol	Epaisseur 20-100cm	Epaisseur 0-100cm	3
Absence totale de sol	Absence totale de sol	Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 0-100cm	-	-	-	-	4

**Infiltration, I.** L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité des formations géologiques présentes en surface ou en sub-surface à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie. L'IDPR est disponible sous forme de grille sur le bassin Seine-Normandie ; il est à utiliser sous forme polygonale, à partir des polygones de la carte géologique au 1/50 000. Pour chaque formation géologique, une valeur médiane de l'IDPR sera calculée.

De plus, en présence de thalwegs, chenaux ou drains collectant les eaux de ruissellement, l'extension du bassin d'alimentation devra être effectuée, si le bassin versant de ceux-ci sort du BAC. L'IDPR sera appliqué également sur cette surface. Si des cours d'eau permanents ou temporaires infiltrant sont présents au niveau du BAC considéré, leur bassin versant sera considéré. Une valeur d'indice égale à 3 (vulnérabilité forte à très forte) sera affectée.

Cinq classes sont proposées pour ce paramètre, à savoir : I0 pour les valeurs d'IDPR comprises entre 2000-1600, I1 pour les valeurs comprises entre 1200-1600, I2 pour les valeurs comprises entre 800-1200, I3 pour les valeurs comprises entre 400-800 et I4 pour les valeurs comprises entre 0-400.

Comme pour les systèmes aquifères continus, si l'IDPR s'avère inadapté à la configuration du BAC, il faudra le découper en cellules d'infiltration efficace homogène puis calculer l'infiltration efficace de chaque cellule (cf. 5.3.2).

### 6.3.3 Poids des paramètres et classes de vulnérabilité

La somme des poids affectés est égale à 1. Ils sont présentés sous forme de pourcentage dans le tableau ci-dessous:

Paramètre	Abréviation	Poids (%)
Discontinuités	D	50
Infiltration	I	30
Sol – couverture protectrice	S	20

En se basant sur cette pondération, la formule de calcul est la suivante :

$$\text{Vulnérabilité} = 0.5 D + 0.3 I + 0.2 S$$

Les discontinuités ont le poids le plus important dans la mesure où elles constituent les zones d'infiltration et donc de risque de pollution préférentielles.

La valeur finale de vulnérabilité varie donc entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale).

Valeurs indice	Classe	Vulnérabilité
3,2 – 4	4	Très élevée
2,4 – 3,19	3	Elevée
1,6 – 2,39	2	Modérée
0,8 – 1,59	1	Faible
0 – 0,79	0	Très faible

*Classes de vulnérabilité*

### 6.3.4 Exemple d'application

L'exemple présenté ci-dessous n'est pas issu des exemples de bassins d'alimentation testés dans le cadre de l'étude, mais d'un guide élaboré par l'Office de l'Environnement de Suisse pour la délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré (OFEFP, 2004). Il est présenté en détail dans le rapport BRGM/RP-55875-FR.

L'aquifère est constitué par une alternance de grès, conglomérats et marnes de la Molasse subalpine. Le bassin d'alimentation du captage a été délimité sur la base de critères topographiques, d'essais de traçages et de la présence d'autres sources non-captées. Sa surface est d'environ 1 km<sup>2</sup>.

L'évaluation du paramètre "discontinuités" a été réalisée essentiellement sur la base d'une cartographie géomorphologique, avec en particulier un inventaire des nombreuses petites dolines présentes sur le site. Les essais de traçage, quelques

profils géophysiques, ainsi que des observations en période de fortes précipitations ont permis de justifier l'attribution des différents indices. L'évaluation du paramètre "couverture protectrice" a été effectuée grâce à une cartographie des sols, essentiellement sur la base de sondages à la tarière et de quelques essais d'infiltration. L'évaluation de la vulnérabilité prend également en compte un ruissellement abondant (sol peu perméable et fortes pentes) alimentant les zones les plus vulnérables. La carte de vulnérabilité est en fait élaborée comme une carte de protection (Illustration 11). Plus la protection est faible, plus la vulnérabilité est forte.



Illustration 11 - Site de Rieden, carte du "facteur de protection final" (in OFEFP, 2004).

## 7 Cas d'un système aquifère discontinu karstique

### 7.1 ETUDE ET CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE

Deux types de bassins d'alimentation des sources karstiques doivent ainsi être distingués en fonction de la nature de leur impluvium (Illustration 7) :

- (i) les bassins d'alimentation de type endogène, c'est-à-dire constitués uniquement par les formations carbonatées affleurantes (système karstique unaire). Dans ce cas, l'impluvium correspondant à la surface du bassin d'alimentation du captage – source ou forage – est constitué uniquement de terrains karstifiables.
- (ii) les bassins d'alimentation « mixtes » - endogène et exogène, constitués de terrains carbonatés karstifiés et de terrains non karstifiables, sur lesquels les eaux peuvent ruisseler et s'infiltrer en un point (perte) ou une zone donnée (proche du contact entre les terrains karstiques et non karstifiables) (système karstique binaire). Dans ce cas, une partie de l'impluvium est constituée de terrains non karstifiables qui concentrent l'infiltration de eaux en un point au niveau d'une perte, l'autre partie étant constituée de terrains karstifiables.

### 7.2 DELIMITATION DU BAC

La délimitation des bassins d'alimentation des captages de sources ou forages en milieu karstique doit prendre en considération la caractérisation du type de système. Cette caractérisation nécessite une reconnaissance de terrain, des jaugeages différentiels sur le cours d'eau concerné supposé avoir des pertes en différentes conditions hydrologiques, un suivi hydrologique de la source sur un ou plusieurs cycles hydrologiques et une analyse des débits selon la méthode statistique des débits classés ; cette dernière permet de mettre en évidence l'existence d'une alimentation retardée ou d'un autre système (Marsaud, 1996).

La délimitation des bassins d'alimentation des captages de sources en milieu karstique est effectuée :

- (i) à partir de la prise en considération de la **structure géologique** et de la mise en œuvre **d'essais de traçages artificiels** pour prouver l'existence de connexions hydrauliques pour différentes conditions hydrologiques (à noter l'existence possible de diffluences des écoulements en fonction des



conditions hydrologiques : c'est-à-dire que la surface du bassin d'alimentation peut varier au cours d'un cycle hydrologique).

- (ii) à partir de la **délimitation du bassin versant des écoulements de surface alimentant les pertes**, à l'aide d'un modèle numérique de terrain et/ou des cartes IGN au 1/25.000 ;

Le **calcul du bilan hydrologique** permet une vérification de la surface du bassin délimité par les méthodes précédentes et/ou fournit des éléments pour mieux cibler sa délimitation.

L'étude des bilans hydrologiques repose sur l'analyse de la cohérence qui existe entre les flux d'entrée et les flux de sortie à l'exutoire d'un système. La méthode consiste à évaluer pour une période donnée, le volume d'eau écoulé à l'exutoire ( $V = \text{débit de la source} \times \text{durée de la période}$ ) et le volume des pluies qui renouvelle les réserves et entretient l'écoulement dans le système. Elle repose ainsi sur la détermination des précipitations efficaces. Les pluies efficaces représentent la quantité d'eau fournie par les précipitations qui reste disponible pour le système, après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle (ETR) et d'une partie du ruissellement. Le coefficient de ruissellement peut être extrêmement variable à l'échelle d'un bassin d'alimentation; le ruissellement peut être concentré et participer à l'alimentation du système karstique ou au contraire ne pas contribuer à l'écoulement de l'exutoire. Il est laissé à l'expertise de l'hydrogéologue d'apprécier la prise en compte ou non du ruissellement dans l'établissement du bilan hydrologique.

Les pluies efficaces sont déterminées généralement au pas de temps mensuel selon la formule suivante :  $P_{\text{eff}} = P - \text{ETR}$

La surface du bassin d'alimentation du système est déterminée à l'aide du rapport suivant :  $S_{\text{alimentation}} = V / P_{\text{eff}}$

L'estimation de l'ETR est le problème de base de la méthode, la détermination des paramètres climatiques sur les zones d'études n'étant pas aisée. Ainsi, la méthode d'estimation de l'ETR fréquemment utilisée consiste à calculer le déficit d'écoulement à partir de la formule de Turc, qui permet de limiter les paramètres climatiques à la température et aux précipitations.

Le calcul du déficit d'écoulement  $D$  par cette méthode empirique est basé sur la

formule suivante :  $D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$  avec  $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$

où  $P$  représente les précipitations (mm) et  $T$  la température ( $^{\circ}\text{C}$ ) moyenne de l'air. La surface d'alimentation du système est alors déterminée en appliquant le rapport suivant :  $S_{\text{alimentation}} = V / (P - D)$  où  $V$  représente le volume d'eau écoulé à l'exutoire,  $P$  la lame d'eau précipitée et  $D$  le déficit d'écoulement.

Il existe des méthodes plus sophistiquées d'évaluation de l'ETR par simulation numérique prenant en compte la conductivité à saturation du sous-sol (Bussard, 2005)

La superficie du bassin d'alimentation peut également être approchée à l'aide d'une modélisation selon des approches globales de type fonctions de transfert ou modèles de réservoirs des chroniques de débits de la source (en utilisant par exemple le logiciel GARDENIA). La superficie du bassin d'alimentation est un des paramètres de calage du modèle.

## 7.3 CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE

### 7.3.1 Choix de la méthode

Une **méthode multicritère à index avec système de pondération** dont les critères sont sélectionnés en fonction des caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques est sélectionnée. La méthode **RISKE** développée à partir de la méthode EPIK (Dörfliger, 1996) est une méthode qui sert à apprécier la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Cette méthode est basée sur la méthode RISKE modifiée (Plagnes et al., 2006) pour laquelle le critère Infiltration est défini à partir des pentes et intègre les phénomènes exokarstiques tels que dolines, avens. Le critère Epikarst est considéré comme un élément protecteur tout comme le critère Sol ; ainsi ces deux critères sont assemblés en un seul critère de protection avant agrégation de l'ensemble des critères. Les notions de karst uniaire et binaire sont intégrées dans la définition du critère Karstification, de façon à pouvoir mieux comparer des systèmes karstiques entre eux.

La mise en œuvre de cette méthode consiste à identifier les caractéristiques qui définissent chaque critère indexées de 0 à 4, allant du moins au plus vulnérable. Un système de pondération est ensuite introduit traduisant l'importance relative des critères les uns par rapport aux autres. Afin de n'introduire aucun biais, il est basé sur une méthode mathématique de hiérarchisation. Un Système d'Information Géographique (SIG) est utilisé dans la méthode afin de faciliter l'établissement de la carte de vulnérabilité finale selon la taille et la complexité de la zone d'étude. La méthode RISKE vise à fournir des documents directement utilisables par les décideurs » (Pételet-Giraud et al. 2000).

La méthode se déroule suivant 5 étapes essentielles après avoir délimité la zone d'alimentation de la (ou les) source(s) karstique(s) : (i) Cartographie de chaque critère au 1/25 000<sup>e</sup> ou 1/50 000<sup>e</sup> suivant les données disponibles. Chaque critère est subdivisé en classes matérialisées par un indice allant de 0 à 4. (ii) Discrétisation des cartes ainsi obtenues : la taille de la maille est définie en fonction du pas du **Modèle Numérique de Terrain** de la zone d'étude et des données disponibles. (iii) Calcul de l'indice de vulnérabilité global Ig en chaque maille. L'indice de classe de chaque critère est multiplié par le facteur de pondération du critère considéré (qui traduit l'importance relative des critères entre eux vis à vis de la vulnérabilité). Les valeurs obtenues pour les 5 critères sont ensuite additionnées pour obtenir l'indice de Vulnérabilité global Ig. Cette étape revient à superposer les 5 cartes des critères indexés afin d'obtenir une représentation cartographique de la répartition de l'indice Ig. (iv) Etape de régionalisation : La valeur de l'indice Ig est ensuite subdivisée en 5 classes de vulnérabilité traduisant la sensibilité relative du milieu aux influences naturelles et

anthropiques. (v) Etape de validation : la carte de vulnérabilité obtenue est confrontée avec les cartes de chaque critère indexé afin de vérifier qu'il n'y ait pas d'incohérence flagrante et que certains aspects pouvant localement être essentiels ne se retrouvent pas minimisés voire masqués.

### 7.3.2 Paramètres pris en compte et classification

Les critères ainsi que leur classification pris en considération sont présentés ci-dessous.

**Roche, R.** Ce critère caractérise le type de formation qui constitue la roche aquifère. En effet, la nature des formations géologiques contrôle en partie les circulations d'eau et donc le transfert des polluants potentiels dans la zone non saturée et dans la zone saturée. La fracturation est aussi prise en compte en même temps que la nature lithologique des terrains. Les accidents ne sont pris en compte dans le périmètre de vulnérabilité que dans le cas où des failles majeures présenteraient de grandes zones de broyage associées qui seraient à relativiser suivant l'échelle de cartographie utilisée.

La cartographie du critère R est réalisée à partir de l'analyse des cartes géologiques (1/50 000<sup>e</sup>) et complétée par des visites de terrain. Seules les formations aquifères sont prises en compte, les autres étant considérées comme des formations de couverture et ainsi associées au critère Sol (S).

- **R0** : influence nulle à très faible sur la vulnérabilité : cette classe regroupe les formations marneuses (35-65% de minéraux argileux) qui, si elles peuvent être aquifères, auront une influence très limitée en termes de vulnérabilité, les circulations d'eau restant relativement lentes.
- **R1** : influence faible sur la vulnérabilité : cette classe regroupe les formations marno-calcaires (25-35% de minéraux argileux) qui auront une influence limitée en termes de vulnérabilité, les circulations d'eau restant là encore relativement lentes.
- **R2** : influence moyenne sur la vulnérabilité : cette classe regroupe les formations de calcaires marneux (10-25% de minéraux argileux).
- **R3** : influence forte sur la vulnérabilité : cette classe regroupe les formations calcaires et dolomitiques, soit massives en gros bancs non fracturés, soit en petits bancs avec des intercalations argilo-marneuses avec une fracturation homogène. Ce type de formation permet des circulations relativement faciles et rapides.
- **R4** : influence très forte sur la vulnérabilité : cette classe regroupe les formations les plus vulnérables constituées par les calcaires en gros bancs massifs affectés d'une fracturation en grand importance.

**Infiltration, I.** Une distinction est ainsi faite entre infiltration diffuse et infiltration lente. Les paramètres primordiaux sont la pente qui favorise plus ou moins le ruissellement au détriment de l'infiltration, et les pertes qui permettent une infiltration très rapide

jusqu'à l'aquifère. La carte des pentes peut être réalisée à partir du Modèle Numérique de Terrain.

- **I0** : cette classe regroupe les zones du bassin où les pentes sont très fortes (>50%), induisant un ruissellement de l'eau très important et une infiltration négligeable voire même nulle.
- **I1** : zones où les pentes sont fortes (15-50%) favorisant grandement le ruissellement.
- **I2** : zones du bassin où la pente est moyenne (5-15%) et/ou zones où le ruissellement est limité en terrains carbonatés (ex. vallées sèches).
- **I3** : zones à pente faible (0-5%) où le ruissellement est limité et l'infiltration beaucoup plus forte. Les zones avec dolines et poljés sont prise en compte dans cette classe, ainsi que les zones cultivées où le sol est travaillé (sillons) perpendiculairement à la pente. De même, les champs drainés par un système de drainage artificiel sont classés dans cette catégorie.
- **I4** : manifestations de l'infiltration concentrée au niveau des pertes. Ne sont retenues dans la classification "perte" que les pertes situées sur un cours d'eau temporaire ou non. A la perte elle-même est associé le bassin versant du cours d'eau l'alimentant.

**Sol, S.** Les formations pédologiques forment une couverture protectrice au-dessus des roches aquifères. Pour la détermination du critère S nous avons été amenés à considérer deux types d'information :

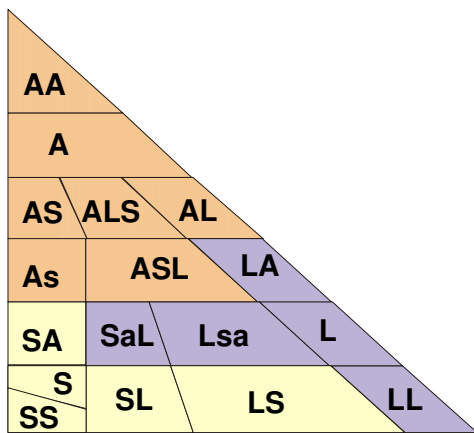
- L'épaisseur du sol et, si elle est connue, sa nature (texture et proportion de cailloux),
- La présence ou non d'une couverture protectrice (horizon géologique) entre la roche et le sol.

Les paramètres importants en termes de protection, en plus de l'épaisseur, sont ceux qui conditionnent la vitesse d'infiltration et les échanges susceptibles de se produire dans les horizons de sol, soit la texture (teneur en argiles, limons et sables) et la pierrosité (teneur en cailloux). Trois classes de textures ont été retenues dans la même optique que les études précédentes (Desprats et al., 1998; Dörfliger, 1996; Suais et al., 1990) : dominante d'argiles, dominante de limons, dominante de sables. De la même façon trois classes de pierrosité ont été identifiées : 0-15% de cailloux, 15-60% de cailloux et > 60% de cailloux.

Les 17 textures différentes ont été réparties en **3 classes** simplifiant ainsi l'approche retenue par Suais et al. (1990) et Desprats et al (1998) qui avaient retenu 5 classes (Illustration 12).

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

Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses



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

Illustration 12 : Triangle des textures des sols

Ces deux paramètres, texture et pierrosité, ont été croisés pour déterminer la nature du sol qui est ensuite combinée avec l'épaisseur des sols. En l'absence de données pédologiques relatives à la nature des sols, une approche simplifiée est adoptée en ne considérant que l'épaisseur.

Exemple : si on considère un sol limoneux à pierrosité moyenne (45 % de cailloux), d'épaisseur 30 cm recouvrant une formation calcaire sans horizon protecteur, le critère S sera déterminé de la manière suivante :

- Texture = 2 x pierrosité = 2 donne nature du sol = 2
- Epaisseur 20-100 cm x sol sur horizon faiblement protecteur x nature du sol = 2 donne **indice = 3**

		Texture		
		1 (argile)	2 (limon)	3 (sable)
% cailloux	1 (0-15%)	1	1	2
	2 (15-60%)	1	2	3
	3 (>60%)	2	3	3

		Nature du sol			
		inconnue	1	2	3
Epaisseur	1 (>100cm)	S1	S1	S2	S3
	2 (20-100 cm)	S2	S2	S3	S4
	3 (0-20cm)	S3	S3	S4	S4
	4 nulle	S4	S4	S4	S4

Caractéristiques				Caractéristiques				Indice
Sol sur matrice nue ou avec un horizon géologique faiblement protecteur (éboulis, alluvions)				Sol sur horizon géologique important de faible conductivité hydraulique (argiles, argiles marneuses, conglomérats et brèches massifs)				
Nature du sol inconnue	Nature de sol connue			Nature du sol inconnue	Nature de sol connue			
	1	2	3		1	2	3	
	-	-	-	Couverture protectrice > 5m (avec sol ou non)				0
Epaisseur > 100cm	Epaisseur > 100cm	-	-	Couverture protectrice 1-5m ou > 1m avec un sol de texture inconnue ou de type 1 > 20cm				1
Epaisseur 20-100cm	Epaisseur 20-100cm	Epaisseur > 100cm	-	Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 20-100cm	-	2
Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 20-100cm	Epaisseur > 100cm	Absence totale de sol	Absence totale de sol	Epaisseur 20-100cm	Epaisseur 0-100cm	3
Absence totale de sol	Absence totale de sol	Epaisseur 0-20cm	Epaisseur 0-100cm	-	-	-	-	4

**Karstification, K.** La classification retenue pour le critère K est la suivante :

- **K0** : karst unaire non fonctionnel c'est-à-dire système carbonaté dont le degré de karstification ne permet pas un fonctionnement karstique: pas de récupération du traceur dans le cas de traçages artificiels ou très faible restitution.
- **K1** : karst unaire peu/moyennement fonctionnel avec des vitesses de traçage artificiel lentes et des temps de séjour longs.
- **K2** : karst unaire fonctionnel, avec des indices de karstification développée: des vitesses de traçage artificiel rapides, une forte variabilité du débit et de la chimie de la source ou karst binaire pas / peu fonctionnel.
- **K3** : karst binaire moyennement fonctionnel : réseau karstique bien développé, présence d'un drain collecteur de petite taille connu (ou présumée d'un gros) connecté avec la surface. Traçage(s) à circulation rapide
- **K4** : karst binaire très fonctionnel : Réseau karstique très bien développé, présence d'un gros collecteur connecté avec la surface. Traçage(s) à circulation rapide

**Épikarst, E.** L'épikarst correspond à la partie superficielle d'une formation carbonatée sous couverture ou non. Cette zone est très fracturée du fait de la décompression des terrains provoquée par le relâchement des contraintes tectoniques liées à leur mise en place. Elle est karstifiée à cause de la dissolution préférentielle le long des fractures. Elle peut ainsi jouer le rôle de réservoir temporaire après les périodes de précipitations. Ce critère est ainsi considéré comme un élément protecteur.

La mise en évidence d'une zone épikarstique n'est pas toujours facile, en particulier lorsqu'elle est couverte. De plus, l'extension latérale de l'épikarst n'est pas forcément continue. L'identification de l'épikarst ne peut donc se faire qu'à partir d'observations au niveau d'affleurements le long de routes, dans des carrières, ...

- **E0** : existence d'un épikarst épais (> 1m) continu latéralement et très bien développé, présentant des figures de dissolution horizontales et verticales témoignant de dissolution en milieu noyé.
- **E1** : épikarst moins épais (50 cm à 1m), plus ou moins continu latéralement, pouvant stocker temporairement de l'eau à proximité de la surface.
- **E2** : épikarst peu épais (2à à 50cm), moyennement développé et discontinu, avec une capacité de stockage en surface moyenne.
- **E3** : épikarst peu épais (> 20cm) ou absent localement, discontinu et peu développé, avec une faible possibilité de stockage temporaire
- **E4** : pas d'épikarst, donc aucune possibilité de stockage temporaire en sub-surface

L'agrégation du critère Sol et du critère Epikarst en un critère P dit de protection, en retenant le critère le plus protecteur entre le sol et l'épikarst est réalisé, si le critère E a pu être caractérisé. Autrement seul le critère Sol est considéré. Par croisement des deux cartes Sol et Epikarst et à l'aide d'un logiciel SIG, chaque nouvelle entité résultante retient l'indice minimum des deux critères présents, comme explicité dans le tableau ci-dessous.

P	S	E
P0	Ou S0	E0 à E4
	S0 à S4	E0
P1	Ou S1	E1 à E4
	S1 à S4	E1
P2	Ou S2	E2 à E4
	S2 à S4	E2
P3	Ou S3	E3, E4
	S3, S4	E3
P4	S4	E4

### 7.3.3 Poids des paramètres et classes de vulnérabilité

La somme des poids affectés est égale à 1. Ils sont présentés sous forme de pourcentage.

Paramètre	Abréviation	Poids (%)
Roche	R	30
Infiltration	I	50
Protection	P ou S si E non existant	10
Karstification	K	10

En se basant sur cette pondération, la formule de calcul est la suivante :

$$\text{Vulnérabilité} = 0.3 R + 0.5 I + 0.1 P(S) + 0.1 K$$

La valeur finale de vulnérabilité varie donc entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale).

Valeurs indice	Classe	Vulnérabilité
3,2 – 4	4	Très élevée
2,4 – 3,19	3	Elevée
1,6 – 2,39	2	Modérée
0,8 – 1,59	1	Faible
0 – 0,79	0	Très faible

*Classes de vulnérabilité*

### 7.3.4 Exemple d'application

La zone d'étude couvre le territoire de la Communauté du Canton de Bolbec, situé dans le département de Seine-Maritime. Le bassin versant hydrogéologique est situé dans l'aquifère de la craie. La présence de bétoires, les résultats d'une campagne de traçages, les analyses chimiques (en particulier turbidité) et une visite de terrain ont permis de conclure au caractère karstique du système

Le BAC a été déterminé à partir d'essais de traçages, de l'étude géomorphologique, et de l'étude de l'alimentation de la nappe par les rivières. Il correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage augmenté du bassin versant topographique des bétoires connectées aux forages.

Pour la cartographie de la vulnérabilité, le paramètre Infiltration a été évalué à partir des classes de pente issues du MNT. Le paramètre Sol a été évalué en fonction de la carte géologique au 1/50.000 et des reconnaissances de terrain, sachant que la carte géologique fournit de nombreuses informations sur les formations superficielles. L'étude n'ayant pas mis en évidence d'épikarst, le critère Protection n'est donc fonction que du Sol. Enfin le degré de karstification a été évalué à partir de l'essai de traçage et de la corrélation entre les phénomènes de crue du Bolbec et la turbidité de l'eau des captages.

Cette carte (Illustration 14) montre que la zone la plus vulnérable est située au niveau des bassins versants d'alimentation des bétoires connectées (pertes temporaires), liée à la forte valeur du paramètre I. Le reste du BAC a une vulnérabilité moyenne, résultat de la protection des argiles sur les plateaux et de la forte pente sur les matériaux alluvionnaires.

Cet exemple est présenté en détail dans le rapport BRGM/RP-55875-FR.



Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

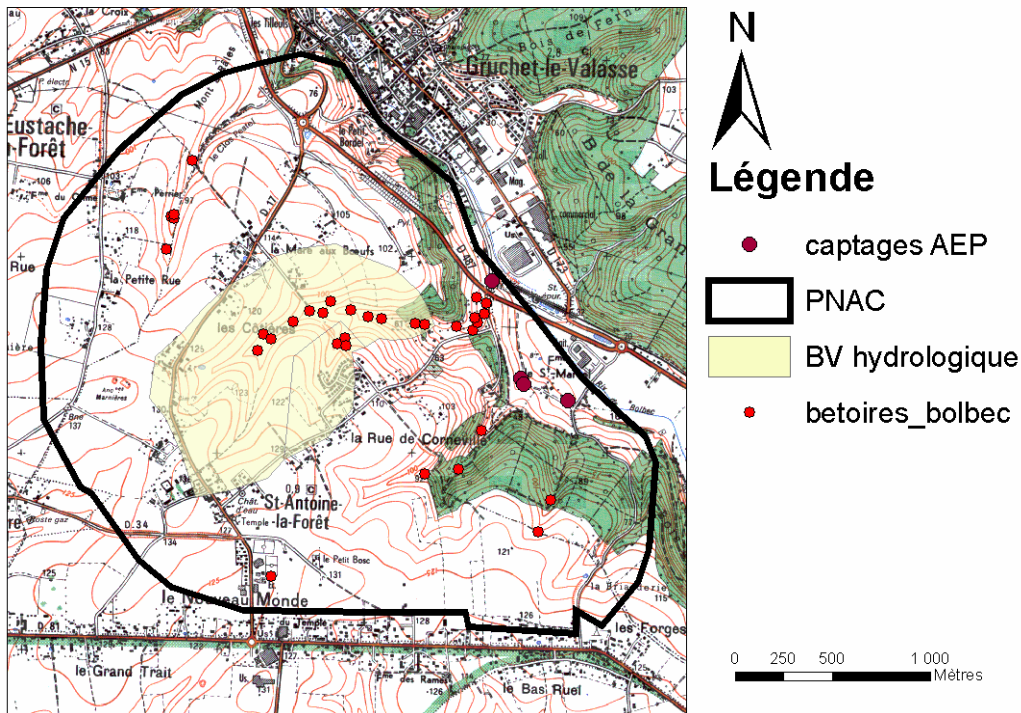


Illustration 13 : Carte du bassin d'alimentation des captages de Bolbec

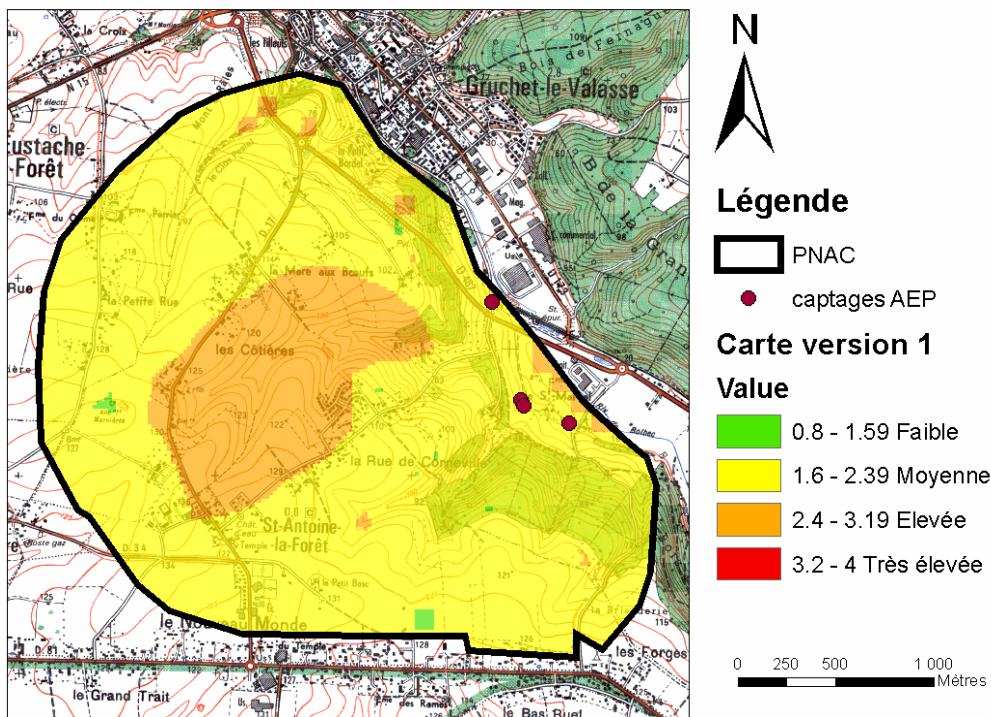


Illustration 14 - Exemple de carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation des captages de Bolbec

## 8 Conclusion et perspectives

La mise en œuvre des méthodes de délimitation d'un bassin d'alimentation de captage et de cartographie de sa vulnérabilité, nécessite d'avoir au préalable caractérisé du point de vue hydrogéologique le système associé au captage d'eau potable. Le bassin d'alimentation doit être délimité à partir des connaissances géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques. Le bilan hydrologique du système sera déterminé ou estimé en fonction des données disponibles.

Les méthodes décrites doivent pouvoir être mises en œuvre de manière aisée par des hydrogéologues praticiens. Les informations à acquérir nécessitent de collecter des données à partir des études préalables, de documents cartographiques (cartes topographiques, géologiques, pédologiques), ou spatialisés (photos aériennes), de banques de données, ainsi que des reconnaissances de terrains et si nécessaire l'acquisition de données complémentaires. Des observations naturalistes sont indispensables pour bien apprécier les différents critères et choisir l'indice de vulnérabilité approprié pour chaque critère.

Les méthodes de caractérisation de la vulnérabilité proposées dans ce guide sont basées sur des méthodes existantes, impliquant comme pour tout guide de ce type une nécessaire simplification de la réalité. Il convient néanmoins d'insister sur le caractère empirique de la définition des paramètres de vulnérabilité, qui peuvent de ce fait être soumis à discussion. Ce guide pourra ainsi être mis à jour au vu de la confrontation des méthodes proposées aux réalités du terrain et/ou grâce au développement de nouveaux outils de caractérisation de la sensibilité des eaux souterraines aux pollutions diffuses.



## 9 Sources de données

Nature de la donnée	Echelle	Origine	Remarques
<b>MNT (grille SIG)</b>	pas de 50 m	BD ALTI (IGN) <a href="http://www.ign.fr">www.ign.fr</a>	Permet de générer une grille de pente  <b>Données payantes</b>
<b>Carte pédologique</b>	1/250.000 1/100.000	INRA <a href="http://gissol.orleans.inra.fr/actualite/publications.php">http://gissol.orleans.inra.fr/actualite/publications.php</a>	Descriptif des unités de sol ; Couverture incomplète  <b>Données payantes</b>
<b>Carte pédologique</b>	1/50.000 1/25.000 1/10.000	INRA <a href="http://www.inra.fr">www.inra.fr</a>	Couverture très faible  <b>Données payantes</b>
<b>Référentiel Régional Pédologique (base de données cartographique)</b>	1/250.000	INRA : Programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols du GIS Sol  <a href="http://gissol.orleans.inra.fr/gissol/gissol.php">http://gissol.orleans.inra.fr/gissol/gissol.php</a>	Chaque UTS est caractérisée par des données descriptives (texture, hydromorphie, nature du matériau d'origine, profondeur d'apparition du substrat...). Couverture incomplète (cf. état d'avancement en fin de chapitre)  <b>Données payantes</b>
<b>Base de données d'analyses de terre</b>	Cantonale	INRA <a href="http://www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php">http://www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php</a>	données statistiques à l'échelle cantonale : texture, MO, indice de battance...  <b>Données payantes</b>
<b>Carte géologique vectorisée</b>	1/50.000	BRGM <a href="http://www.brgm.fr">www.brgm.fr</a>	L'harmonisation des cartes géologiques vectorisées est en cours à l'échelle nationale  <b>Données payantes</b>
<b>Cartes géologiques de la France métropolitaine au 1/50.000 avec notices</b>	1/50.000	BRGM <a href="http://www.brgm.fr">www.brgm.fr</a>	Pour préciser la géométrie et la lithologie de l'aquifère et de sa couverture éventuelle. Format papier  <b>Données payantes</b>

Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

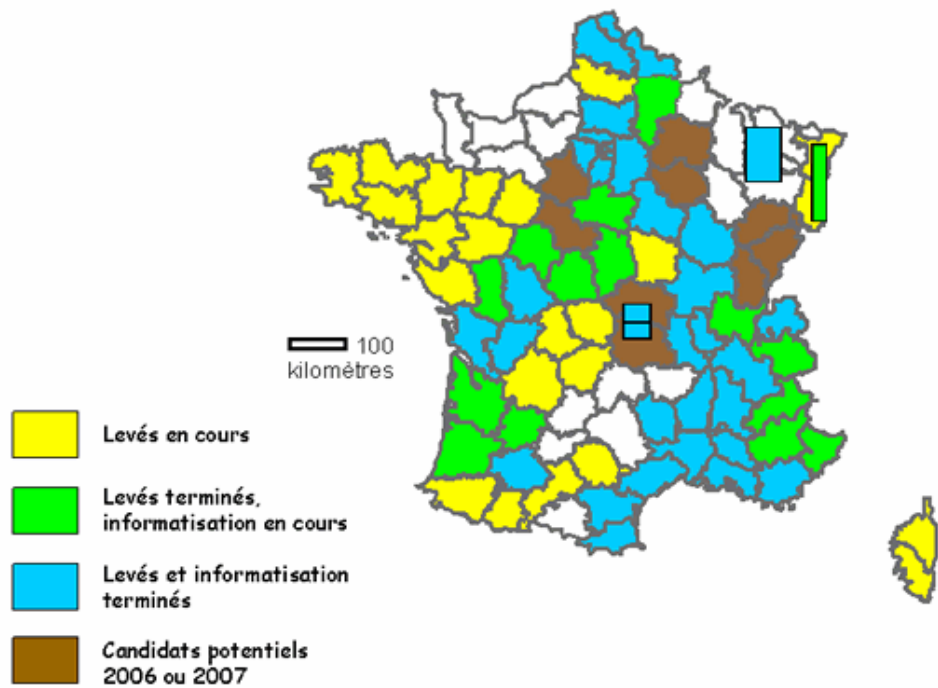
<b>Atlas hydrogéologique</b>	département	BRGM <a href="http://www.brgm.fr">www.brgm.fr</a>	Données publiques
<b>Cartes piézométriques</b>	Variable	Variée	A rechercher localement. Il en existe de nombreuses (HE, BE, ME), sous des formats polygones, parfois grilles
<b>IDPR</b>	1/50.000	BRGM <a href="http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-54257-FR">http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-54257-FR</a>	Fournit le rapport infiltration / ruissellement ; disponible sur l'ensemble de la France  Données publiques
<b>BD Carthage (référentiel hydrographique)</b>	1/50.000	IGN <a href="http://www.ign.fr">www.ign.fr</a>	Disponible sur l'ensemble de la France  Données payantes
<b>BDRHF-V1 (Base de Données sur le Référentiel Hydrogéologique Français)</b>	1/50.0000	BRGM <a href="http://sandre.eaufrance.fr/rubrique.php3?id_rubrique=18">http://sandre.eaufrance.fr/rubrique.php3?id_rubrique=18</a>	délimitation des aquifères à l'intérieur desquels se situe le BAC  Données publiques
<b>Occupation du sol</b>	Communale	RGA (recensement général agricole) <a href="http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/">www.agreste.agriculture.gouv.fr/</a>	Fournit les statistiques agricoles par commune + cartes de types de culture.  Données publiques
<b>Occupation du sol : Corine Land Cover</b>	1/100.000	IFEN <a href="http://www.ifen.fr">www.ifen.fr</a>	Année 2000  Données publiques
<b>Occupation du sol : Photos aériennes</b>	Résolution 50 cm	BD-ORTHO (IGN) <a href="http://www.ign.fr">www.ign.fr</a>	Photos aériennes ortho-rectifiées  Données payantes
<b>AURELHY (grille SIG)</b>	pas de 1 km	METEO-FRANCE <a href="http://www.meteofrance.fr">www.meteofrance.fr</a>	Les données statistiques de précipitations et de températures des différentes stations météo ont été extrapolées en les modulant par le relief

Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

<b>Précipitations efficaces</b>	Pluie : 1 km ETP : 12 km	METEO-FRANCE <a href="http://www.meteofrance.fr">www.meteofrance.fr</a>	Les précipitations efficaces sont évaluées à l'aide d'un modèle numérique où interviennent les précipitations, l'insolation, le rayonnement et la température  <b>Données payantes</b>
<b>Précipitations, ETP</b>	données ponctuelles	METEO-FRANCE <a href="http://www.meteofrance.fr">www.meteofrance.fr</a>	<b>Données payantes</b>
<b>ADES (Banque de données sur les eaux souterraines)</b>	données ponctuelles	Diverse (BRGM, DIREN, collectivités, DDASS, agences de l'eau, ...) <a href="http://www.ades.eaufrance.fr/">http://www.ades.eaufrance.fr/</a>	Données des réseaux de suivi quantitatifs et qualitatifs des eaux souterraines  <b>Données publiques</b>
<b>Banque HYDRO</b>	données ponctuelles	MEDAD <a href="http://www.hydro.eaufrance.fr/">www.hydro.eaufrance.fr/</a>	Chroniques de débits de rivière et débits de sources  <b>Données publiques</b>
<b>BSS</b>	données ponctuelles	BRGM <a href="http://www.brgm.fr/numerique.jsp">http://www.brgm.fr/numerique.jsp</a>	Données géologiques et hydrogéologiques (niveau d'eau, transmissivité, débit).  <b>Données publiques</b>  L'ensemble des données disponibles sur une zone peut être obtenue automatiquement via les <b>Géor@pports</b>  <b>Données payantes</b>
<b>BD Cavité</b>	données ponctuelles	BRGM <a href="http://www.bdcavite.net/">http://www.bdcavite.net/</a>	Localisation des cavités d'origine anthropique ou naturelle en France  <b>Données publiques</b>
<b>BASIAS</b>	données ponctuelles	BRGM <a href="http://basias.brgm.fr/">http://basias.brgm.fr/</a>	Inventaire des anciens sites industriels et activités de service  <b>Données publiques</b>
<b>BASOL</b>	données ponctuelles	MEDAD <a href="http://basol.ecologie.gouv.fr/">http://basol.ecologie.gouv.fr/</a>	<b>Base de données</b> sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif

			ou curatif.
			<a href="#">Données publiques</a>

### État d'avancement des Référentiels Régionaux Pédologiques fin 2005



source GIS Sol

## 10 Boite à outils

### 10.1 OUTILS DE CARTOGRAPHIE

Parmi les systèmes d'information géographique (SIG) existant sur le marché, on peut citer par exemple ArcGIS (ESRI ©) ou Mapinfo. Tous les deux disposent d'un module dédié à la manipulation des grilles : il s'agit respectivement de « Spatial Analyst » et de « Vertical Mapper ».

Dans le cadre de l'étude, ArcGIS a été utilisé. Des utilitaires accessibles gratuitement sur internet (<http://support.esri.com/>) ont été ajoutés aux outils déjà disponibles dans le logiciel. Il s'agit notamment de :

- Arc Hydro Tools 1.2 for ArcGIS 9.2 : cet outil permet de cartographier les limites d'un bassin versant souterrain ou superficiel à partir respectivement d'une grille piézométrique ou d'un MNT ;
- Convex Hull : cet outil permet de générer la courbe enveloppe correspondant à un ensemble de points.

### 10.2 OUTILS DE MODELISATION ET DE DELIMITATION DE LA PORTION DE NAPPE ALIMENTANT LE CAPTAGE

**Logiciel ASMWIN** (Aquifer Simulation Model for Windows) : logiciel maillé gratuit, ASMWIN a été développé par W. Kinzelbach et R. Rausch. Il est téléchargeable sur le site de l'ETH (Institut Fédéral de Technologie) de Zürich <http://www.ifu.ethz.ch/publications/software/asmwin>.

**Logiciel WhAEM** (Wellhead Analytic Element Model) : Il s'agit d'un logiciel 2D, développé par l'EPA (Agence américaine de l'environnement), basé sur la méthode des éléments analytiques. Ce modèle est en téléchargement libre sur le site de l'EPA (<http://www.epa.gov/athens/software/whaem/index.html>). (version de 2005)

**Logiciel MARTHE** : développé par le BRGM, destiné à modéliser les problèmes d'écoulement rencontrés dans des contextes variés. Une version gratuite limitée en nombre de maille (3 couches de 900 mailles chacune), mais suffisante pour traiter de nombreux BAC peut être demandée à l'auteur ([marthe@brgm.fr](mailto:marthe@brgm.fr)) et devrait être prochainement proposée en téléchargement libre. <http://www.brgm.fr/logiciel.jsp>

**Logiciel MODFLOW** : développé par l'USGS (Service géologique national américain), code de calcul hydrodynamique 3D en différences finies pour la simulation des écoulements en milieux poreux. <http://www.modflow.com>



## Outil basé sur une approche de type Monte-Carlo

*Avertissement : Cet outil a été développé sous Excel pour tester la délimitation d'un BAC par une approche stochastique afin de prendre en compte l'incertitude sur le paramètre transmissivité. Il s'agit d'un prototype qui est opérationnel et peut être fourni aux personnes intéressées, mais dont l'utilisation ne saurait en aucun cas engager la responsabilité du BRGM. Il est par ailleurs fourni sans manuel d'utilisation.*

L'outil vise à déterminer des courbes enveloppes de la portion de nappe alimentant un captage d'eau potable. Celles-ci sont générées à partir d'une approche statistique - dite de Monte-Carlo - basée sur un grand nombre de valeurs pour le jeu de paramètres considérés dans le calcul de la PNAC.

L'approche est basée sur un écoulement unidirectionnel en domaine captif. L'équation analytique utilisée découle des équations de Bear et Jacob.

L'outil calcule 5000 valeurs de T de façon aléatoire entre des bornes fixées par l'utilisateur. A partir de là, il calcule les coordonnées des points de la courbe enveloppe (X, Y et R pour différentes valeurs de  $\theta$ ) pour chacun des cas correspondant à un captage placé en (0,0). Des valeurs de distance radiale basées sur les quartiles sont fournies dans l'onglet restitution.

Dans l'onglet X&Y, l'outil génère les coordonnées cartésiennes des points (r,theta) pour pouvoir les représenter sous Excel. Y est introduite la direction de l'écoulement régional. Deux graphiques sont joints afin de proposer une première visualisation des courbes enveloppes (avec ou sans prise en compte de l'écoulement régional)

L'onglet données permet à l'utilisateur d'introduire ses paramètres. Il permet de calculer la distance radiale pour 6 valeurs différentes de theta. Le cas  $\theta \rightarrow 0$  est traité (calcul de la largeur du front d'emprunt).

Les résultats sont aussi fournis sous la forme de points de coordonnées cartésiennes métriques. L'utilisateur doit alors fournir les coordonnées cartésiennes métriques du captage d'eau potable.

Les données à fournir par l'utilisateur sont:

- les bornes mini et maxi de la transmissivité
- le gradient hydraulique en régime naturel ;
- la valeur du débit de pompage (en m<sup>3</sup>/h);
- l'angle fait par l'écoulement régional avec un axe Est-Ouest;
- les coordonnées cartésiennes métriques du captage d'eau potable;
- le coefficient de dispersion pris en compte;
- les angles  $\theta$  pour lesquels les coordonnées des points des courbes enveloppes sont calculées (6 par run).

Le calcul des valeurs est effectué automatiquement.

## 10.3 OUTILS DE CALCUL DU BILAN HYDROLOGIQUE

**Logiciel GARDENIA** : développé par le BRGM, il sert à construire des modèles globaux qui mettent en relation un signal d'entrée -la pluie- et l'un ou l'autre signal de sortie -un niveau de nappe ou un débit de cours d'eau ou de source-. Le calage du modèle se fait à l'aide de constantes de temps et d'un coefficient de répartition de l'eau dans le sol entre ruissellement et infiltration. Les simulations sont toujours en régime transitoire et permettent de déduire la variabilité des composantes du cycle de l'eau entre ruissellement, écoulements souterrains rapides, écoulements lents et débit à l'exutoire.

## 11 Eléments de coût

Le temps à investir dans le cadre d'une étude de bassin d'alimentation de captage est non seulement dépendant des caractéristiques du captage et du contexte hydrogéologique mais également des données géologiques et hydrogéologiques existantes ainsi que de l'étendue, la complexité et l'accessibilité du site considéré et de la diversité de l'utilisation du territoire.

Dans la mesure où le coût de l'étude est conditionné par la taille du BAC, il est nécessaire pour la constitution d'un cahier des charges d'appel d'offres, d'évaluer la taille du bassin versant hydrogéologique sur lequel va porter l'étude de définition du BAC et de sa vulnérabilité. Ceci demande en amont une première compilation des données existantes permettant aux bureaux d'études prestataires de dimensionner l'étude. Suivant le niveau de connaissance initial, cela peut nécessiter une assistance à maîtrise d'ouvrage pour réaliser la consultation pour l'étude (notamment lors du manque d'informations initiales et/ou cas hydrogéologiques complexes). Cette assistance à MO pourra également évaluer l'adéquation entre l'enjeu du captage (ressource en eau – unicité, qualité,..., besoins de la commune) et les coûts qui seront à budgéter pour l'étude et les mises en œuvre des préconisations (et donc les capacités financières de la collectivité).

Des éléments de coûts sont donnés dans le tableau suivant. **Le calcul du temps de travail nécessaire pour l'application de la démarche méthodologique est indicatif.** Dans les cas complexes ou si la documentation existante est insuffisante, des programmes d'acquisition de données complémentaires doivent être envisagées et les coûts fournis ci-dessous peuvent être largement dépassés. Il faut également intégrer le coût d'achat de données (Météo-France, BRGM, IGN,...).

Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

	taille du bassin						
	quelques dizaines de km <sup>2</sup>				> 100 km <sup>2</sup>		
	Milieu continu	Milieu fissuré	Milieu karstique		Milieu continu	Milieu fissuré	Milieu karstique
Compilation documentation existante (géologie et hydrogéologie)	2	2	2	jours	5	5	5
Reconnaissance des captages et du bassin versant souterrain, première tournée de mesures	1	1	1	jours	4	4	4
tournées de mesure au captage (base de 10 à raison d'une par mois)	5	5	5	jours	5	10	10
Interprétation des données, rapport intermédiaire	2	2	2	jours	4	4	4
Etude détaillée du bassin d'alimentation (discontinuités, zones d'infiltration)	1	2	2	jours	4	8	8
calcul de la zone d'appel	1			jours	2		
Essai multi-traçage (organisation, injection, interprétation)		5	5	jours		5	5
Suivi d'événements de crue		2	2	jours		4	4
évaluation de la qualité de l'eau	1	1	1		3	3	3
Interprétation des données, Délimitation du bassin d'alimentation du captage, rapport intermédiaire	2	3	3	jours	6	10	10
évaluation des paramètres de vulnérabilité	2	5	5	jours	4	8	8
Interprétation, réalisation des cartes de vulnérabilité	2	2	2	jours	4	4	4
Contrôles de terrain (nature des sols et du sous-sol), ajustement	1	2	2	jours	2	3	3
Rédaction du rapport final	2	2	2	jours	5	5	5
gestion de projet, comités de pilotage	2	2	2	jours	3	3	3
<b>total jours</b>	<b>24</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>jours</b>	<b>51</b>	<b>76</b>	<b>76</b>
coût sur une base de 500 € par jour				€			
	12 000	18 000	18 000		25 500	38 000	38 000
analyses chimiques (majeurs, nitrates, pesticides), déplacements	10 000	10 000	10 000	€	10 000	10 000	10 000
essai multi-traçage (déplacements, traceurs, échantillonnage, analyses)		21 500	21 500	€		21 500	21 500
<b>coût total de l'étude</b>	<b>22 000</b>	<b>49 500</b>	<b>49 500</b>	<b>€</b>	<b>35 500</b>	<b>69 500</b>	<b>69 500</b>
En option : investigations complémentaires (par exemple prospection électrique)	15 000	15 000	15 000		30 000	30 000	30 000

## 12 Bibliographie sommaire

<http://eu-footprint.org/fr/> - site internet du projet FOOTPRINT visant à développer des outils afin d'évaluer le risque de contamination des eaux par les pesticides

Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée et Corse (1999) – Guide technique n°3 : Connaissance et gestion des ressources en eau souterraine dans les régions karstiques, collection des notes et guides techniques du SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse.

BRGM (2004) – A. Gravier, J-Y Koch-Mathian, V. Mardhel et C. Nowak. Croisement des données des sites BASOL avec la vulnérabilité simplifiée des nappes du bassin Seine-Normandie, rapport de synthèse, BRGM/RP-54257-FR, 95 pages, 17 fig., 2 ann.

Bussard T. (2005) – Méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants, thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 162 p.

COST Action 620 (2003) - Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers, Final Report, F.Zwahlen Chairman, Editor in chief. European Commission, Directorate XII Science, Research and Development, Report EUR, 20912, Brussels, 297 pp

Dörfliger N. (2005) - Guide méthodologique, cartographie de la vulnérabilité en vue de la délimitation des périmètres de protection en milieu karstique. Annexe du rapport BRGM/RP-53576-FR

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

Mangin A (1984) - Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *J. Hydrol.* **67**, pp. 25–43

Marsaud B. (1997) – Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux, Ph D Thesis, Orsay-Paris XI, BRGM, Orléans, 301p.

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

Plagnes V., Théry S., Fontaine L., Bakalowicz M., Doerfliger N. (2006) - Cartographie de la Vulnérabilité des Karsts : Evolution de la méthode RISKE, Les ressources en eau en région karstique, 4 et 5 mai 2006, Rouen.

Pochon A., Zwahlen, F. (2003) - Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré – Guide pratique. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne, 83 p.

Rasmussen, H., Rouleau, A. et Chevalier, S. (éditeurs scientifiques) (2006) – Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine. 311 pages. Document diffusé par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec .  
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protec/index.htm>

Schudel et al. (2002) – Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie, guide pratique. Rapport OFEG, Sér. Géol. 3, 77 p.  
<http://www.bafu.admin.ch/php/modules/shop/files/pdf/phpBT1KGC.pdf>

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2007a) – Délimitation des bassins d'alimentation de captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses, exemple de six bassins test, rapport BRGM/RP-55875-FR, à paraître

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Seguin J.J., Dörfliger N. (2007b) - Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP-55332-FR, 128 pages, 125 illustrations, 8 annexes

## 13 Glossaire

**Aquifère** : Formation géologique constituée de roches perméables, permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine.

**Bassin versant de surface**: ensemble des pentes inclinées vers un même cours d'eau et y déversant leurs eaux de ruissellement.

**Bassin versant souterrain syn. Bassin hydrogéologique** : partie d'un aquifère, simple ou complexe dans laquelle les eaux souterraines s'écoulent vers un même exutoire ou groupe d'exutoires ; il est délimité par une ligne de partage des eaux souterraines.

**Bilan hydrologique** : il vise à établir le budget entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant une période de temps donné. Il est basé sur la résolution de l'équation  $P = I + R + ETR + \Delta R$  (P : précipitations ; I : Infiltration ; R : Ruissellement ; ETR : évapotranspiration réelle ;  $\Delta R$  = variations des réserves en eau).

**Couverture protectrice** : couches de sol et de sous-sol situées au-dessus de la nappe d'eau souterraine. L'effet protecteur de cette couverture dépend de son épaisseur, mais aussi et surtout de sa composition: les matériaux fins abritent mieux l'eau, tandis que des roches fissurées ou karstiques ne retiennent guère les polluants. Mais c'est la terre végétale qui offre la meilleure protection.

**Doline** : dépression circulaire ou elliptique, généralement moins profonde que large, située à la surface des roches solubles, telles le calcaire, et résultant de leur dissolution chimique.

**Épikarst** : l'épikarst ou la zone épikarstique rassemble l'eau d'infiltration dans un aquifère perché local et discontinu, drainé vers le bas soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides de petites dimensions, en une infiltration lente.

**Évapotranspiration** : Ensemble des phénomènes et des flux d'évaporation physique et de transpiration biologique, notamment de la végétation, qui interviennent dans le bilan d'eau d'un territoire, d'un hydrosystème terrestre, comme facteur de flux sortant. Elle est exprimée le plus généralement en hauteur moyenne évaporée sur la surface considérée pendant une durée définie. On distingue l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR). L'ETP représente le pouvoir évaporant de l'atmosphère qui serait celui que l'on observerait sur un sol avec couvert végétal, où l'eau serait disponible en abondance. Si l'eau vient à manquer, l'ETR est fonction de l'ETP et de l'eau disponible.

**Failles** : fentes et fissures dans les roches dures.

**Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR)** : méthode d'analyse multicritères permettant de rendre compte de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Elle est basée sur la comparaison entre un réseau hydrographique théorique et le réseau naturel conditionné par la géologie.

**Infiltration** : phénomène du passage de l'eau (ou d'un autre fluide) à travers la surface du sol, de sa pénétration dans le sol et de son mouvement descendant dans la zone non saturée du sous-sol.

**Karst** : Région de calcaires et dolomites ayant une topographie souterraine particulière due à la dissolution de certaines parties du sous-sol et au cheminement des eaux dans les galeries naturelles ainsi formées.

**Karstification** : processus particulier d'érosion commandées par la dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies). L'eau de pluie s'infiltré dans le sol où elle acquiert de l'acidité nécessaire à la mise en solution de la roche en se chargeant en CO<sub>2</sub>.

**Pertes** : lieu où un cours d'eau de surface, permanent ou temporaire, disparaît naturellement, en totalité ou partiellement, dans le sous-sol

**Pluie efficace** : quantité d'eau fournie par les précipitations qui reste disponible, à la surface du sol, après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle

**Réserve utile** : Quantité d'eau du sol dont la végétation peut disposer pour assurer son alimentation en eau en l'absence de précipitation (de l'ordre de 100 mm en climat tempéré)

**Ruissellement** : ce terme désigne l'eau de pluie qui s'écoule à la surface du sol.

**Traceur syn. marqueur** : organisme ou substance, naturel ou artificiel, permettant l'étude des processus physiques, chimiques ou biologiques du milieu dans lequel il se trouve.

**Traçage**: méthode de mise en évidence des réseaux de drainage souterrains par injection d'eau marquée. Les techniques de marquage font appel à des colorants fluorescents (uranine, fluoresceïne, rhodamine, leucophore, pyranine etc.), à des spores Lycopodium, ou encore à des composés chimiques tels que le chlorure de sodium.

**Vulnérabilité intrinsèque** : terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités anthropiques. C'est une propriété générale, non mesurable et sans dimension.

**Vulnérabilité spécifique** : vulnérabilité d'un aquifère à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

**Zone non saturée** : Zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre ; elle représente la zone d'infiltration de l'aquifère.

**Zone saturée** ou zone noyée (pour les aquifères karstiques) : Zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches, formant dans un aquifère, une nappe d'eau souterraine.



**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34