



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

BRGM/RP-55332-FR
Mai 2007



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

BRGM/RP-55332-FR

Mai 2007

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

J.F. Vernoux, A. Wulleumier, J.J. Seguin, N. Doerfliger
Avec la collaboration de
A. Martin

Vérificateur :

Nom : A. Gutierrez

Date : 25/06/2007

Signature :

Approbateur :

Nom : D. Pennequin

Date : 02/07/2007

Signature :



Mots clés : délimitation, bassin d'alimentation de captage, aire d'alimentation, pollution diffuse, bassin Seine-Normandie, captage d'alimentation en eau potable

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

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Seguin J.J., Dörfliger N. (2007) - 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

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

Synthèse

Pour mettre en œuvre des mesures agro-environnementales dans un souci d'efficacité optimum vis-à-vis de la protection de la ressource et des captages d'alimentation en eau potable, il apparaît indispensable de travailler à l'échelle du bassin d'alimentation du captage (BAC) et pour ce faire, de disposer d'une méthodologie de délimitation de ces bassins. Afin de mieux définir les mesures agro-environnementales et, le cas échéant de les hiérarchiser, il apparaît également nécessaire de prendre en compte la vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Ceci permettra de définir **les zones sur lesquelles** l'Agence de l'Eau Seine-Normandie orientera ses actions.

L'étude proposée et financée par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, la Direction de l'Eau et le BRGM comporte trois phases :

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

Cette méthodologie sera déclinée de manière spécifique en fonction des types d'aquifères rencontrés sur le bassin Seine-Normandie (alluvial, sédimentaire karstique ou non, socle)

Le présent rapport rend compte de la première phase de l'étude. Il définit les principaux termes et concepts relatifs aux bassins d'alimentation et à la vulnérabilité des eaux souterraines et fait la distinction entre aire d'alimentation et périmètre de protection d'un captage. Un chapitre expose les méthodes de délimitation des bassins d'alimentation des captages et des zones contributives à cette alimentation en distinguant les milieux poreux, fissurés et karstiques. Un autre chapitre présente les méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines là aussi selon les types d'aquifère (DRASTIC et IDPR pour les aquifères sédimentaires, EPIK et RISK pour les aquifères karstiques, DISCO pour les aquifères fissurés). Enfin un troisième chapitre fait une analyse comparative de 38 études réalisées sur le bassin Seine-Normandie afin d'évaluer les approches mises en œuvre sur des cas concrets.

Sommaire

Introduction	15
1. Contexte de l'étude et terminologie	17
1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE	17
1.2. BASSIN D'ALIMENTATION ET BASSIN VERSANT SOUTERRAIN	18
1.3. PORTION DE NAPPE ALIMENTANT LE CAPTAGE, AIRE D'ALIMENTATION, ZONE D'INFLUENCE, ZONE D'APPEL	28
1.4. BASSIN D'ALIMENTATION D'UNE SOURCE ET D'UN CAPTAGE	32
1.5. AIRE D'ALIMENTATION ET PERIMETRE DE PROTECTION D'UN CAPTAGE	34
1.6. VULNERABILITE DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE	39
2. Méthodes de délimitation des bassins d'alimentation des captages et des zones contributives à cette alimentation	41
2.1. DELIMITATION DU BASSIN D'ALIMENTATION DU CAPTAGE	42
2.1.1. Identification des systèmes d'écoulement	42
2.1.2. Portion de l'aquifère qui alimente le captage	44
a) Méthode des limites structurales	44
b) Méthode hydrodynamique graphique	46
c) Méthodes analytiques.....	48
d) Modèles numériques	49
e) Méthodes complémentaires.....	50
f) Avantages et inconvénients des différentes méthodes	52
2.1.3. Délimitation de l'extension en surface du bassin d'alimentation.....	53

2.1.4. Cas des milieux fissurés	56
2.1.5. Cas des milieux karstiques	56
a) Formulation d'une méthode de délimitation des bassins d'alimentation en milieu karstique.....	57
b) Calcul du bilan hydrologique.....	58
c) Analyse des débits classés	59
2.1.6. Facteurs influençant la délimitation des BAC.....	61
2.2. DELIMITATION DES ZONES DE CONTRIBUTION A L'ALIMENTATION DU CAPTAGE	61
3. Vulnérabilité des eaux souterraines et cartographie multicritère	69
3.1. CONCEPT DE VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES.....	69
3.1.1. Définitions	69
3.1.2. Vulnérabilité de la ressource et origine de la vulnérabilité des eaux souterraines	71
3.1.3. Vulnérabilité et directive européenne sur l'eau	72
3.1.4. Spécificité de la vulnérabilité des aquifères karstiques et fissurés	73
a) Définition d'un aquifère karstique	73
b) Définition d'un aquifère karstique de la craie	75
c) Définition d'un aquifère de type milieu fissuré	76
3.2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DES METHODES DE DETERMINATION DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES.....	77
3.2.1. Méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines. .	77
3.2.2. Caractérisation de la vulnérabilité à l'aide des méthodes de cartographie à index.....	78
3.2.3. Description sommaire des méthodes à systèmes paramétrés	79
a) Les méthodes à systèmes matriciels (MS).....	79

b) Les méthodes à systèmes indexés (RS).....	79
c) Les méthodes de pondération et d'indexation des paramètres (PCSM).....	79
3.2.4. La cartographie de la vulnérabilité spécifique	80
3.2.5. Comparaison des méthodes de cartographie de la vulnérabilité.....	83
3.3. CARTES DE VULNERABILITE REALISEES SUR LE BASSIN SEINE-NORMANDIE	87
3.3.1. Ile-de-France.....	87
3.3.2. Champagne Ardenne	90
3.3.3. Centre	92
3.3.4. Bourgogne	92
3.3.5. Picardie	94
3.3.6. Lorraine.....	97
4. Analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie	99
4.1. INVENTAIRE DES ETUDES ANALYSEES	99
4.2. DEFINITIONS	104
4.3. METHODES UTILISEES POUR LA DELIMITATION DES BAC :	105
4.3.1. Méthode cartographique.....	105
4.3.2. Délimitation s'appuyant sur le calcul du rayon d'influence, de la zone d'appel et/ou des isochrones à 50, 100 et 200 jours.....	106
4.3.3. Utilisation de l'Analyse Factorielle Discriminante (AFD) :.....	107
4.3.4. Utilisation d'un modèle numérique.....	107
4.3.5. Utilisation de traceurs.....	108
4.3.6. Synthèse des méthodes utilisées	108
4.4. SURFACE DES BAC	110

4.5. ANALYSE DE LA VULNERABILITE DANS LES ETUDES TRANSMISES..... 112

Conclusion 115

Références bibliographiques..... 117

Liste des illustrations

<i>Illustration 1- Types d'aquifères présents sur le bassin Seine-Normandie</i>	18
<i>Illustration 2 – Exemple de bassins versants superficiels et souterrains disjoints (in Banton et Bangoy, 1999)</i>	19
<i>Illustration 3- Définition du bassin d'alimentation du captage (in Bussard, 2005)</i>	20
<i>Illustration 4 – bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple</i>	22
<i>Illustration 5 – bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas complexe (in Bussard, 2005)</i>	23
<i>Illustration 6 - Illustration du bassin d'alimentation d'un captage. Il s'agit du secteur, en surface, qui participe à l'alimentation en eau du captage (in Bussard, 2005)</i>	24
<i>Illustration 7 – Détermination de la zone de bordure du bassin d'alimentation du captage sur la base de critères topographiques et géologiques</i>	25
<i>Illustration 8 – Exemple de bassin d'alimentation d'un captage dans un aquifère alluvial (in Bussard, 2005)</i>	25
<i>Illustration 9 – Alimentation des aquifères karstiques (in AERMC, 1999)</i>	26
<i>Illustration 10 – Exemple de bassin d'alimentation pour une nappe captive</i>	27
<i>Illustration 11 - Exemple d'aquifère semi-captif à flux de drainance variable</i>	28
<i>Illustration 12 - Zone d'appel, zone d'influence et aire d'alimentation d'un captage (Lallemand-Barrès et Roux, 1999)</i>	30
<i>Illustration 13 – Zone d'appel créée par un pompage</i>	31
<i>Illustration 14 – Effet du débit sur la portion de nappe alimentant le captage</i>	32
<i>Illustration 15 – Délimitation de bassins d'alimentation de captage par méthode analytique dans la nappe du Calcaire de Champigny (d'après Vernoux et Martin, 2001)</i>	33
<i>Illustration 16– Délimitation de bassins d'alimentation de captage par la méthode des limites topographiques dans la nappe du Calcaire de Champigny (d'après IAURIF, 1996)</i>	34
<i>Illustration 17 - Les trois types de périmètres de protection (Pennequin et al., 2007)</i>	35
<i>Illustration 18 – Distinction entre périmètre de protection et aire d'alimentation</i>	37
<i>Illustration 19 – Synthèse des procédures nationales de protection des eaux souterraines (in Bussard, 2005)</i>	38

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

<i>Illustration 20 - Exemple de communication entre la craie et les alluvions</i>	43
<i>Illustration 21 - limites structurales du bassin d'alimentation de la source des Brévilles (coupe SO-NE)</i>	45
<i>Illustration 22 - Exemple d'application de la méthode graphique en domaine alluvial par détermination de la ligne de partage des eaux (in Bussard, 2005</i>	46
<i>Illustration 23 - Délimitation d'un BAC par cartographie automatique</i>	47
<i>Illustration 24 – Ligne de partage des eaux induite par un puits dans un système d'écoulement uniforme – calcul du point de stagnation en aval (x_L) et la demi-largeur maximale en amont (y_L)</i>	48
<i>Illustration 25 - Approximation de la portion de la nappe qui alimente le puits Neufeld (SO) par combinaison des méthodes analytiques et graphiques, en considérant une situation hydrogéologique moyenne (in Bussard, 2005)</i>	49
<i>Illustration 26 – Détermination de la portion de nappe qui alimente un captage par une méthode advective et par une méthode advective/dispersiv (in Bussard et al., 2004)</i>	50
<i>Illustration 27 – Bilan hydrogéologique (d'après Bussard et al., 2004)</i>	55
<i>Illustration 28 : interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés</i>	60
<i>Illustration 29 : Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés (Marsaud, 1997)</i>	60
<i>Illustration 30 - Quantification du flux d'eau qui atteint la nappe principale (in Bussard, 2005)</i>	63
<i>Illustration 31 - Coefficient de ruissellement en fonction de la nature du sol, de la pente et de l'utilisation du sol. (in Bussard, 2005)</i>	64
<i>Illustration 32 – Interférences liées à la présence d'un autre pompage</i>	65
<i>Illustration 33 - Exemple de détermination du champ de contribution à l'alimentation d'un captage (in Bussard, 2005)</i>	67
<i>Illustration 34 – Approche européenne de la cartographie de la vulnérabilité basée sur le modèle conceptuel "origine-écoulements-cible) (COST Action 620, 2004)</i>	72
<i>Illustration 35 – Schéma d'un aquifère karstique</i>	74
<i>Illustration 36 – Conceptualisation de la vulnérabilité d'un aquifère karstique (Pételet-Giraud et al., 2000)</i>	74
<i>Illustration 37 – schéma conceptuel d'un aquifère fissuré en contexte de socle (granites par ex.) (Lachassagne & Wyns, 2005)</i>	77
<i>Illustration 38- Procédure simplifiée pour l'évaluation des paramètres de la vulnérabilité spécifique (COST 620 Action)</i>	81
<i>Illustration 39 - Schéma général de la démarche de diagnostic régional proposée par le CORPEN</i>	82
<i>Illustration 40 : tableau comparatif des différentes méthodes de caractérisation de la vulnérabilité</i>	85
<i>Illustration 41 : tableau des principales données nécessaires pour la caractérisation des paramètres utilisés dans les différentes méthodes de cartographie de la vulnérabilité</i>	86
<i>Illustration 42 – Vulnérabilité des eaux souterraines en Ile-de-France (source IAURIF)</i>	87

<i>Illustration 43- Comparaison de la cartes de vulnérabilité des Yvelines (source: BRGM : 81 SGN 348 IDF) et de la carte établie avec la méthode IDPR/ZNS</i>	89
<i>Illustration 44 - Comparaison des cartes de vulnérabilité en craie champenoise (en bas la méthode élaborée par J. Ricour, en haut méthode IDPR/ZNS)</i>	91
<i>Illustration 45- Comparaison des cartes de vulnérabilité des eaux souterraines de Bourgogne établies avec les méthodes DRASTIC et IDPR</i>	93
<i>Illustration 46 – Carte de vulnérabilité des masses d'eau souterraines de l'Oise (source DRAF)</i>	96
<i>Illustration 47 :: Nombre de documents transmis et de BAC identifiés par direction de secteur</i>	100
<i>Illustration 48 - Nombre de documents transmis et de BAC identifiés par département</i>	101
<i>Illustration 49 - Nombre de BAC identifiés par aquifères</i>	103
<i>Illustration 50 - Nombre de BAC identifiés par masse d'eau</i>	103
<i>Illustration 51 - Méthodes utilisées pour délimiter les BAC dans les études et CCTP transmis par l'AESN</i>	109
<i>Illustration 52 - méthode utilisée pour la délimitation d'un BAC par type de captage</i>	109
<i>Illustration 53 : Méthodes utilisées pour la délimitation des BAC par contexte hydrogéologique</i>	110
<i>Illustration 54 - Surface des BAC (en km²) par direction de secteur de l'AESN</i>	110
<i>Illustration 55 : Surface des BAC par contexte hydrogéologique</i>	111
<i>Illustration 56 - Critères pris en compte pour la détermination de la vulnérabilité dans les études consultées</i>	112
<i>Illustration 57 : Critères pris en compte pour la détermination de la vulnérabilité en fonction du contexte hydrogéologique</i>	113
<i>Illustration 58 : Détail par étude des critères utilisés pour la détermination de la vulnérabilité</i>	113
<i>Illustration 59 – Approche proposée pour la suite de l'étude</i>	115
<i>Illustration 60 – Paramètres régissant le cheminement de l'eau depuis la surface du bassin d'alimentation jusqu'au captage (in Bussard, 2005)</i>	128
<i>Illustration 61 – Méthodologie pour le dimensionnement de zone de protection des eaux souterraines contre les polluants persistants (in Bussard, 2005)</i>	130
<i>Illustration 62 – Méthodologie générale pour définir des secteurs où des actions de prévention sont souhaitables (adapté de Bussard, 2005)</i>	131
<i>Illustration 63 – Exemple d'application de la méthode graphique en domaine alluvial par détermination de la ligne de partage des eaux (in Bussard, 2005)</i>	133
<i>Illustration 64 – Utilisation de la méthode de Bear et Jacob (1965) pour la délimitation de l'aire délimitation d'un captage (in Bussard, 2005)</i>	134
<i>Illustration 65 – Approximation de la portion de la nappe qui alimente le puits Neufeld (SO) par combinaison des méthodes analytiques et graphiques, en considérant une situation hydrogéologique moyenne (in Bussard, 2005)</i>	134

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

<i>Illustration 66 – Détermination de la portion de nappe qui alimente un captage par une méthode advective et par une méthode advective/dispersive</i>	135
<i>Illustration 67 – Exemple de bassin d'alimentation d'un captage dans un aquifère alluvial (in Bussard, 2005)</i>	138
<i>Illustration 68 – Exemple de bassin d'alimentation d'un captage dans un aquifère karstique (in Bussard, 2005)</i>	138
<i>Illustration 69 – Exemple de bassin d'alimentation d'un captage dans un aquifère de socle (in Bussard, 2005)</i>	139
<i>Illustration 70 – Découpage du bassin d'alimentation en cellule d'infiltration efficace homogène (in Bussard, 2005)</i>	140
<i>Illustration 71 – Calcul de la contribution à l'alimentation du captage en tout point du bassin d'alimentation (in Bussard, 2005)</i>	142
<i>Illustration 72 – Contribution de l'alimentation en eau du captage</i>	142
<i>Illustration 73 – Exemple de dimensionnement des zones sensibles (in Bussard, 2005)</i>	144
<i>Illustration 74 – Exemple théorique de l'application de la méthodologie.(in Bussard, 2005)</i>	144
<i>Illustration 75 – Exemple de détermination du champ de contribution à l'alimentation d'un captage (in Bussard, 2005)</i>	146
<i>Illustration 76 – Méthodologie de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages élaborée au Québec (in Rasmussen et al., 2006)</i>	148
<i>Illustration 77 – Protocole de choix de la méthode d'analyse approfondie (in Rasmussen et al., 2006)</i>	149
<i>Illustration 78 – Avantages et désavantages des cinq familles de méthodes pour déterminer l'aire d'alimentation et les aires de protection (adapté de BCEMLP, 2000)</i>	151
<i>Illustration 79 – Exemple d'approches pour la délimitation d'un périmètre de protection.</i>	155
<i>Illustration 80 - Lignes de courant dans un écoulement uniforme conjugué à un pompage</i>	157
<i>Illustration 81 - Délimitation de la zone d'appel d'un captage à l'aide de la relation E1 avec rotation de la solution pour s'ajuster sur la direction générale d'écoulement.</i>	159
<i>Illustration 82 – Exemple de délimitation de l'aire d'alimentation d'un captage par une méthode analytique</i>	161
<i>Illustration 83 – Données de base nécessaires pour une modélisation hydrodynamique et hydrodispersive</i>	163
<i>Illustration 84-Délimitation automatique de la zone d'appel d'un captage (logiciel ASMWIN)</i>	166
<i>Illustration 85 - Exemple de délimitation d'un BAC avec l'outil WhAEM (source EPA)</i>	167
<i>Illustration 86 – Comparaison entre zones d'appel délimités en régime transitoire et en régime permanent (G. Rock, H. Kupfersberger, 2002)</i>	168
<i>Illustration 87- Distribution de probabilité cumulée de la distance radiale pour un angle θ donné</i>	170
<i>Illustration 88 - Schématisation du processus de l'infiltration selon Green et Ampt</i>	172

<i>Illustration 89 – Tableau des facteurs de pondération de la méthode DRASTIC.....</i>	<i>176</i>
<i>Illustration 90 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « D »</i>	<i>177</i>
<i>Illustration 91 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « R »</i>	<i>177</i>
<i>Illustration 92 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « A ».....</i>	<i>178</i>
<i>Illustration 93 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « S ».....</i>	<i>178</i>
<i>Illustration 94 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « T ».....</i>	<i>178</i>
<i>Illustration 95 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « I »</i>	<i>179</i>
<i>Illustration 96 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « C »</i>	<i>179</i>
<i>Illustration 97 – Tableau des facteurs de pondération de la méthode EPIK (Dörfliger, 1996).....</i>	<i>181</i>
<i>Illustration 98 – Tableau récapitulatif des différents paramètres et pondération de la méthode RISKE (Pételet-Giraud et al. 2001)</i>	<i>190</i>
<i>Illustration 99 – Méthode de hiérarchisation entre critères (Saaty et al., 1977), application à la méthode RISKE (Pételet-Giraud et al., 2001).</i>	<i>191</i>
<i>Illustration 100 – Poids relatifs attribués aux critères R, I, S, K et E.....</i>	<i>192</i>
<i>Illustration 101 – Tableau récapitulatif des critères et indice de la méthode RISK (Dörfliger et al., 2004).....</i>	<i>192</i>
<i>Illustration 102 - Index “ COP” pour la cartographie de la vulnérabilité (Vias et al., 2002).....</i>	<i>196</i>
<i>Illustration 103 - Composantes de l'indice C “flux de concentration” pour calculer l'index C pour le scénario A ; Valeur de C = (dh)*(ds)*(sv) (Vias et al., 2002).....</i>	<i>197</i>
<i>Illustration 104 - Composants de l'index C pour le scénario B: Valeur de C= (sf) * (sv) (Vias et al., 2002).....</i>	<i>198</i>
<i>Illustration 105 - Valeurs de C score et réduction de protection (Vias et al., 2002).....</i>	<i>198</i>
<i>Illustration 106 - Valeur de Os (Vias et al., 2002).....</i>	<i>199</i>
<i>Illustration 107 - Valeur de l'indice OL (Vias et al., 2002)</i>	<i>199</i>
<i>Illustration 108 - Valeur de O et valeur de protection concernant le sol et les formations lithologiques (Vias et al., 2002)</i>	<i>200</i>
<i>Illustration 109 - Classes de vulnérabilité de la méthode PI.....</i>	<i>201</i>
<i>Illustration 110 - Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST 620).....</i>	<i>201</i>
<i>Illustration 111 - Détermination du critère P de la méthode PI, d'après la méthode d'Höftling (1995).....</i>	<i>203</i>
<i>Illustration 112- Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif (COST 620).....</i>	<i>204</i>
<i>Illustration 113 – Démarche méthodologique pour la délimitation des périmètres de protection en milieu fissuré selon Pochon & Zwahlen, 2003.....</i>	<i>205</i>
<i>Illustration 114: Les trois paramètres utilisés dans la méthode DISCO pour les milieux fissurés hétérogènes (Pochon & Zwahlen, 2003)</i>	<i>209</i>

<i>Illustration 115 – Délimitation des périmètres de protection (zones de protection en Suisse) selon la méthode de cartographie multicritère « DISCO » (Pochon&Zwahlen, 2003).</i>	210
<i>Illustration 116 : Tableau du critères occupation du sol et note (Sigter et al., 2006).</i>	214
<i>Illustration 117 - extrait de la carte géologique au 1/50 000 (édition brgm) au niveau du bassin d'alimentation de la source d'Arcier.</i>	220
<i>Illustration 118 - Répartition des dolines et zones de dolines à l'échelle du bassin d'alimentation de la source d'Arcier.</i>	221
<i>Illustration 119 - Bassins versants de surface sur le bassin d'alimentation de la source d'Arcier</i>	222
<i>Illustration 120 - carte du critère R pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier</i>	223
<i>Illustration 121 – Carte du critère I du bassin d'alimentation de la source d'Arcier</i>	224
<i>Illustration 122 – Carte de répartition des sols à partir de l'étude du GRAP (2003) pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier.</i>	225
<i>Illustration 123 – Carte du critère S pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier</i>	226
<i>Illustration 124 – Carte du critère K pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier</i>	226
<i>Illustration 125 – Carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation de la source d'Arcier pour le système de pondération suivant : $0.1 R + 0.5 I + 0.1 S + 0.3 K$</i>	227

Liste des annexes

Annexe 1 - Travaux de l'office de l'environnement helvétique sur le dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les pollutions chimiques persistants.....	123
Annexe 2 - Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages développés au Canada	143
Annexe 3 - Méthodes de calcul pour la délimitation des zones de contribution à l'alimentation du captage	149
Annexe 4 - Description détaillée des différentes méthodes de cartographie de la vulnérabilité et présentation d'un exemple d'application	169
Annexe 5 - Liste des documents transmis par l'Agence de l'Eau.....	225
Annexe 6 - Fiches synthétiques des rapports transmis par l'Agence de l'Eau.....	227
Annexe 7 - Méthodes de détermination des BAC et de la vulnérabilité utilisées dans les rapports transmis par l'Agence de l'Eau.....	229
Annexe 8 - Cartes de localisation des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie	231

Introduction

Dans le cadre de la politique nationale de gestion des eaux souterraines en France, de leur connaissance et de leur protection, en accord avec la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), il apparaît prioritaire de travailler sur les zones protégées pour l'alimentation en eau potable.

A terme l'identification des bassins d'alimentation de captages (BAC) sur chaque masse d'eau souterraine constituera une étape incontournable. Pour mettre en œuvre des mesures agro-environnementales (sur les zones d'action prioritaires définies par l'Agence) dans un souci d'efficacité optimum vis-à-vis de la protection de la ressource et des captages d'alimentation en eau potable, il apparaît indispensable de travailler à l'échelle du bassin d'alimentation du captage (BAC) et pour ce faire, de disposer d'une méthodologie de délimitation de ces bassins. Afin de mieux définir les mesures agro-environnementales et de hiérarchiser les territoires d'action au sein de la zone d'action prioritaire, il est également nécessaire de prendre en compte la vulnérabilité des BAC vis-à-vis des pollutions diffuses, et donc là aussi de disposer d'une méthodologie de définition de cette vulnérabilité. Des périmètres de protection (article L1321-2 du code de la Santé publique) autour du point de prélèvement sont prévus par la réglementation. L'objectif de ces Périmètres de Protection des captages est de prévenir les pollutions accidentelles ou ponctuelles. La prise en compte de la vulnérabilité au sein des BAC, compte tenu de la pression agricole sur le bassin, est donc complémentaire à ces outils existants, et permet la préservation contre les pollutions diffuses.

Enfin la loi sur l'eau et les milieux aquatiques promulguée le 30 décembre 2006 crée un nouveau dispositif réglementaire de lutte contre les pollutions diffuses en permettant aux préfets, après une phase volontaire, d'imposer un programme d'actions dans des zones délimitées en vue de protéger l'aire d'alimentation du captage. Ce nouvel outil juridique viendra renforcer l'action des agences de l'eau sur les bassins d'alimentation des captages. Sa mise en œuvre bénéficiera des conclusions de cette étude.

La première phase de l'étude, objet du présent rapport consiste en un état de lieux sur la définition des BAC et de leur vulnérabilité :

- étude bibliographique pour recenser les méthodologies de délimitation des BAC mises en œuvre sur le bassin, mais également sur les autres bassins en France et à l'étranger,
- bilan de leurs atouts et de leurs inconvénients,
- recenser et classer l'ensemble des éléments pris en compte dans ces études,
- donner un état d'avancement de la délimitation des BAC sur le bassin Seine Normandie (notamment : en nombre, en surface par BAC et par direction de secteur de l'Agence).
- étude bibliographique pour déterminer ce que représentent la notion de vulnérabilité et l'ensemble des critères à prendre en compte intégrant notamment les méthodes multicritères de type DRASTIC (appliquée à tout type

d'aquifère) et les méthodes plus spécifiques aux aquifères karstiques (EPIK (Suisse) , RISK (France, en Franche Comté notamment) ou fissurés (DISCO, Suisse).

Outre l'étude bibliographique générale, nous avons analysé une trentaine d'études de bassins d'alimentation de captages réalisées sur le bassin Seine-Normandie en prenant en compte les points suivants :

- Description des modalités de détermination des BAC : quelle maîtrise d'ouvrage (Conseil Général, DDASS, Syndicat des Eaux, Commune, exploitant...), quelle maîtrise d'œuvre (bureau d'étude, hydrogéologue agréé, Conseil Général, exploitant...), modalités pratiques de mise en œuvre (temps passés, coûts, partenaires, etc....).
- Description des méthodes de détermination des BAC : bibliographie, modélisation, étude recharge/bassin versant impluvium/débit d'exploitation, traçages, piézométrie,... suivant les départements et types d'aquifères.

1. Contexte de l'étude et terminologie

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Les méthodes proposées dans le cadre de cette étude vont naturellement dépendre des types d'aquifères rencontrés. Sur le bassin Seine-Normandie, on rencontre selon la terminologie des masses d'eau souterraine quatre types d'aquifère et un domaine imperméable localement aquifère (Illustration 1) :

- Aquifères alluviaux
- Aquifères sédimentaires non karstiques (libre ou captif)
- Aquifères sédimentaires karstiques¹
- Aquifères de socle (de type fissuré)

Les domaines volcaniques et intensément plissé ne sont pas présents sur le bassin mais seront néanmoins pris en compte dans la synthèse bibliographique.

Dans ce chapitre nous allons expliciter un certain nombre de termes relatifs au bassin d'alimentation d'un captage et à la vulnérabilité²

¹ La carte est basée sur l'état des lieux DCE, cependant une masse d'eau comme la 3308 (Bajo-Bathonien) ne doit pas être considérée comme réellement karstique, bien qu'elle puisse être affectée localement par des circulations rapides plus ou moins karstiques

² Certains termes sont également définis dans le chapitre d'analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie

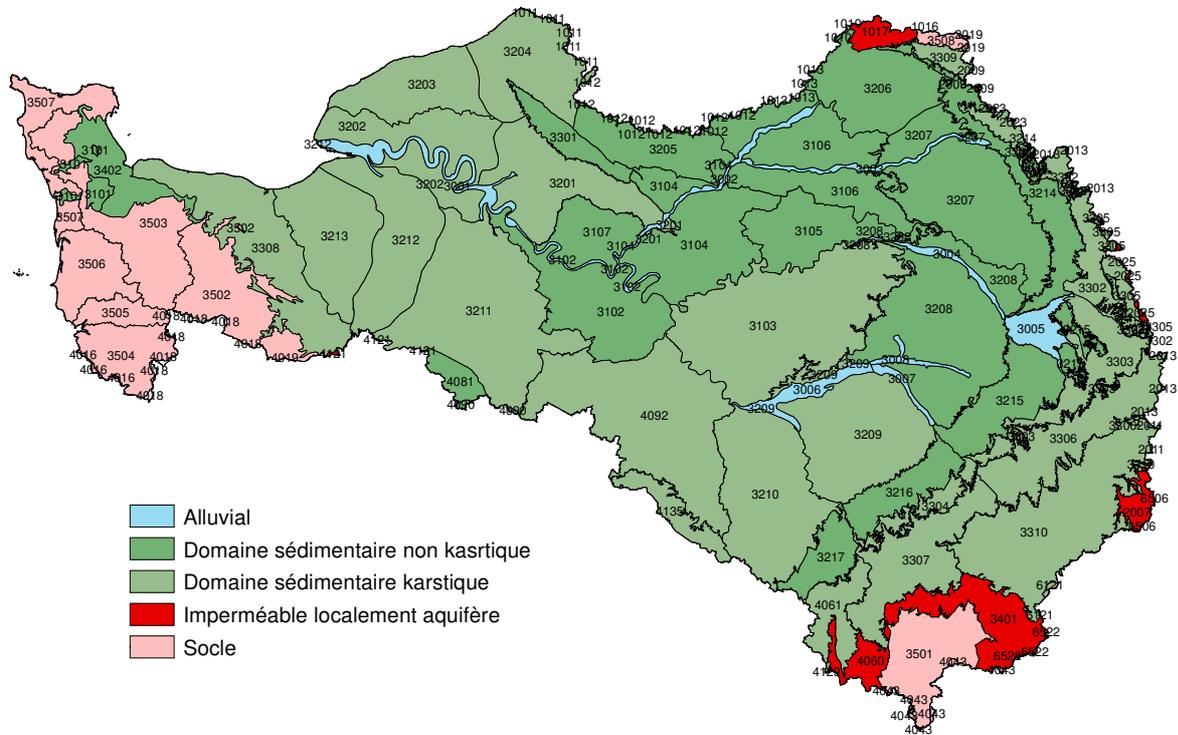


Illustration 1- Types d'aquifères présents sur le bassin Seine-Normandie

1.2. BASSIN D'ALIMENTATION ET BASSIN VERSANT SOUTERRAIN

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 (Castany et Margat, 1977). 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'instar du bassin versant topographique, le bassin versant hydrogéologique correspond au domaine souterrain dans lequel les écoulements convergent vers un

point bas appelé l'exutoire (la source, les captages). C'est donc à la surface de la nappe souterraine (surface piézométrique) que l'on se réfère pour calculer les pentes et le contour des bassins hydrogéologiques. Le bassin versant ainsi défini peut ne pas être confondu avec le bassin versant en surface. En effet, la forme de la surface piézométrique ne dépend pas seulement de la localisation des zones d'infiltration, mais également de la distribution des perméabilités, de la forme des couches imperméables qui constituent la base de la nappe pour les nappes libres (Illustration 10) et de la répartition des pressions (ou charges) pour les nappes captives. En effet, le principe de base de l'écoulement souterrain est qu'il se dirige des charges les plus élevées vers les charges les plus faibles.

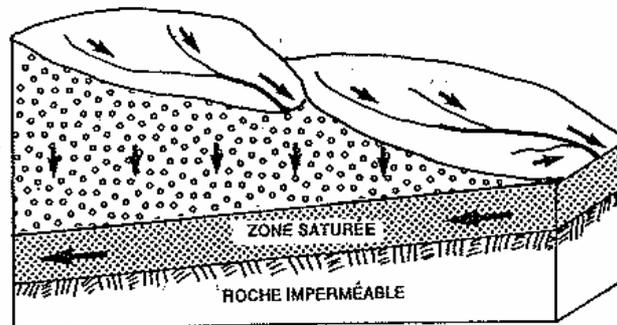
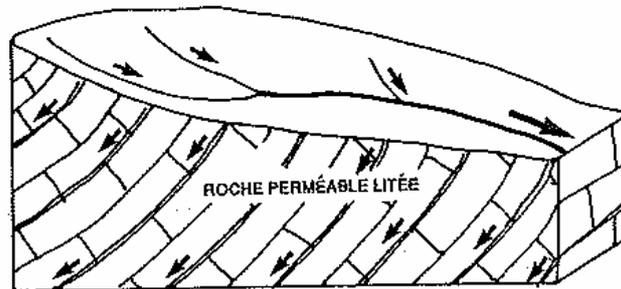


Illustration 2 – Exemple de bassins versants superficiels et souterrains disjoints (in Banton et Bangoy, 1999)

Dans 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 3)

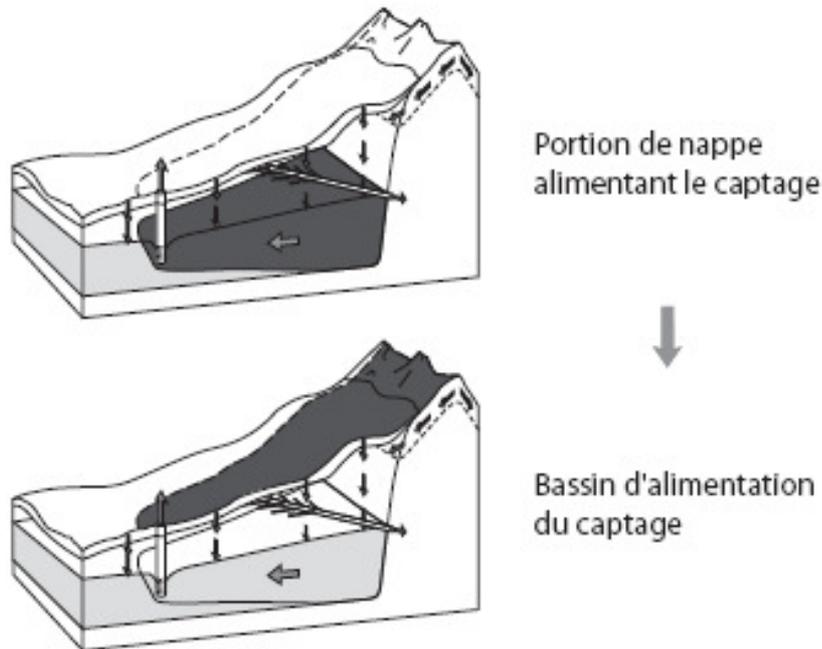


Illustration 3- Définition du bassin d'alimentation du captage (in Bussard, 2005)

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 3). 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 4, 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 était 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.

De même, toute frontière basée sur une crête piézométrique doit être considérée comme une zone plus ou moins large et non comme une ligne de partage. En effet, la crête piézométrique varie dans l'espace selon les contraintes climatiques ou les influences des captages qui sollicitent la nappe. En outre, les crêtes piézométriques ne sont jamais abruptes : il s'agit d'un replat par lequel une ligne de partage est un tracé très arbitraire. Il y a donc lieu de considérer là aussi que des BAC peuvent se superposer localement.

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 (Illustration 5). Dans ce schéma, la couche notée 6 fait partie du bassin d'alimentation puisque sa partie captive alimente l'aquifère principal. A l'inverse la zone située autour du forage noté 12 ne fait pas partie du BAC car les eaux situées dans la zone d'appel de ce forage n'atteindront pas le captage considéré qui est dans ce cas de figure la source à l'exutoire du bassin.

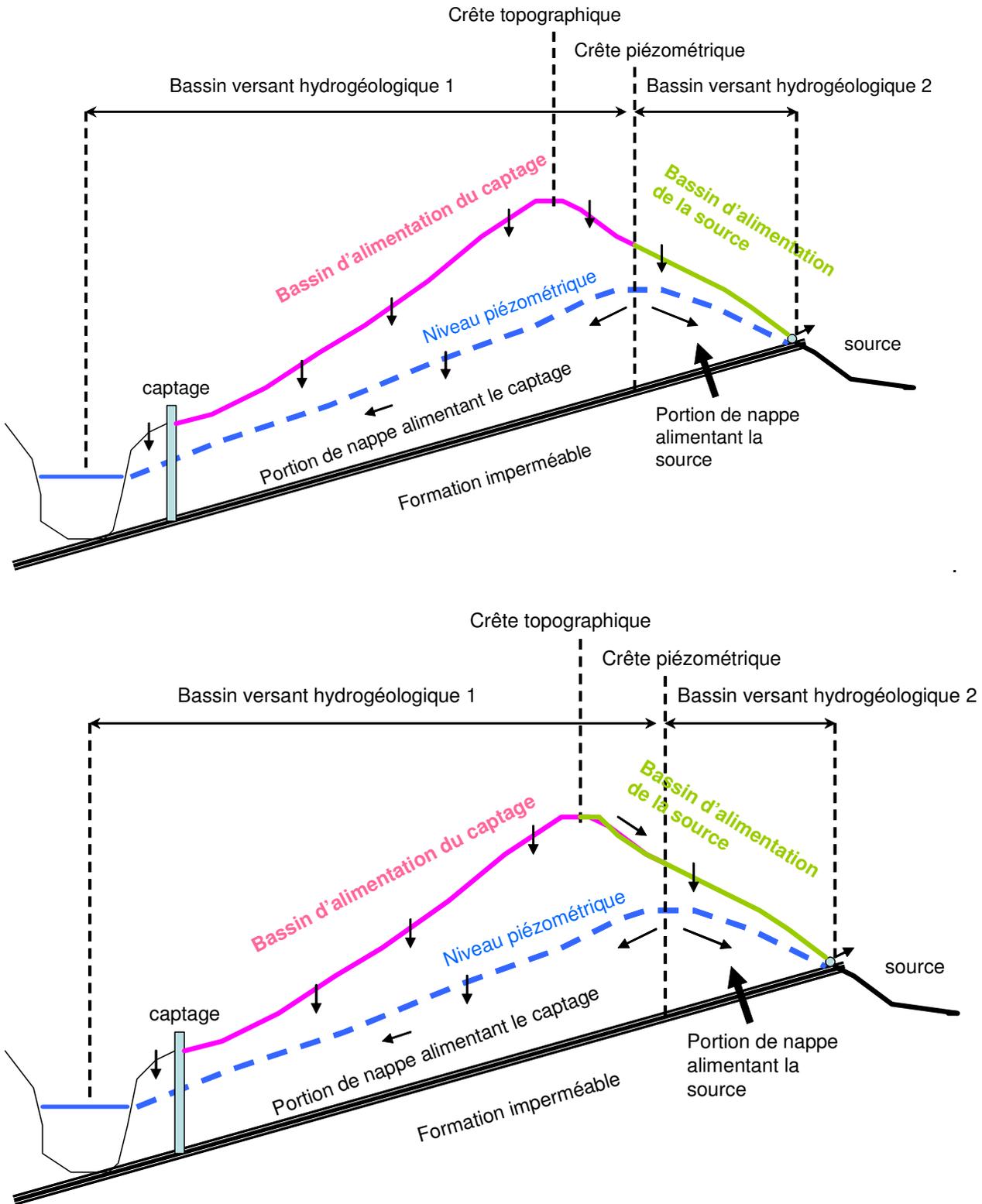


Illustration 4 – bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple

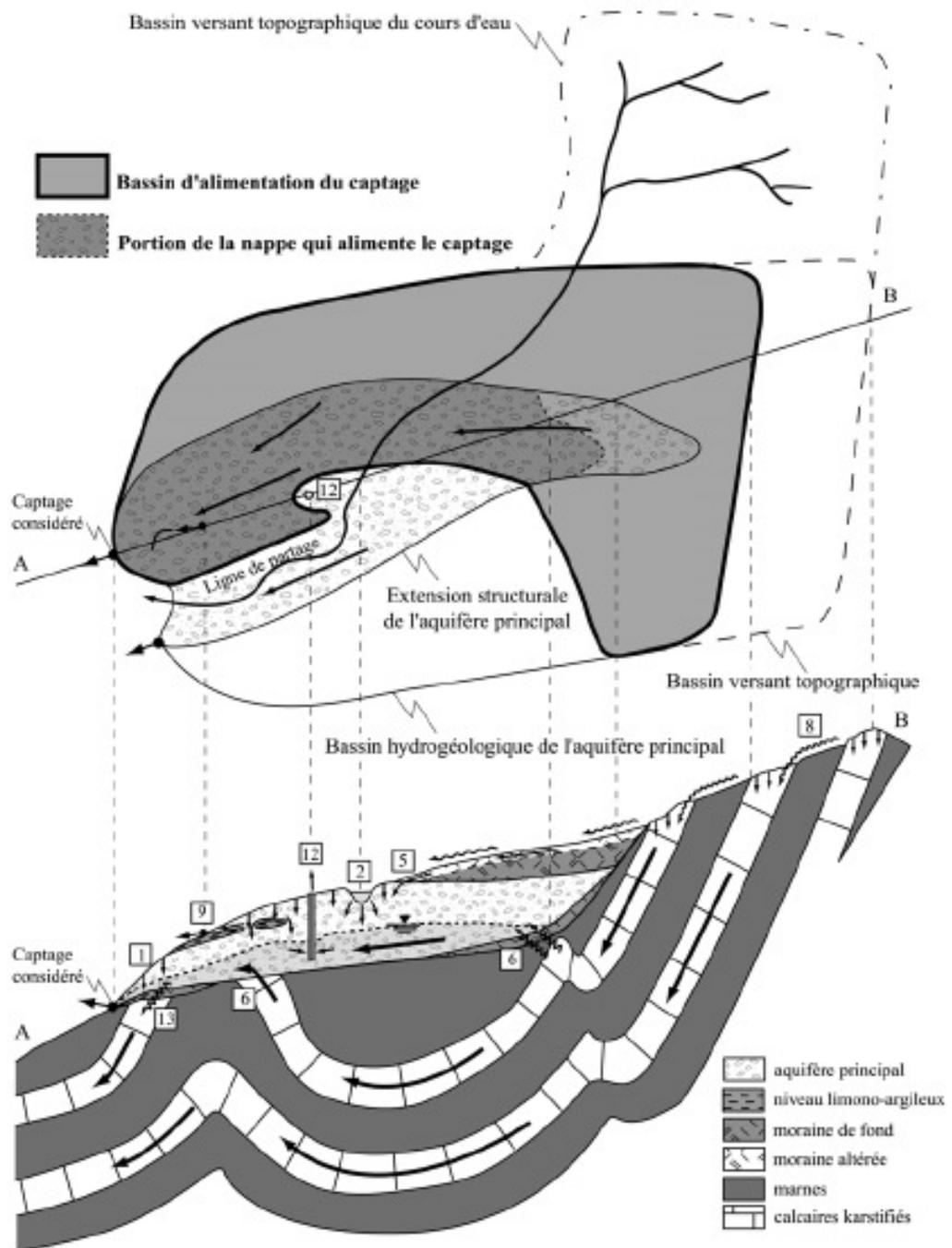


Illustration 5 – bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas complexe (in Bussard, 2005)³

³ Les chiffres de la figure renvoient aux processus d'alimentation et de perte ; ils sont explicités dans le chapitre relatif à la délimitation du bassin d'alimentation du captage.

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 subsurface ou par du ruissellement diffus s'infiltrant en partie, participent à l'alimentation du captage (Illustration 6).

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

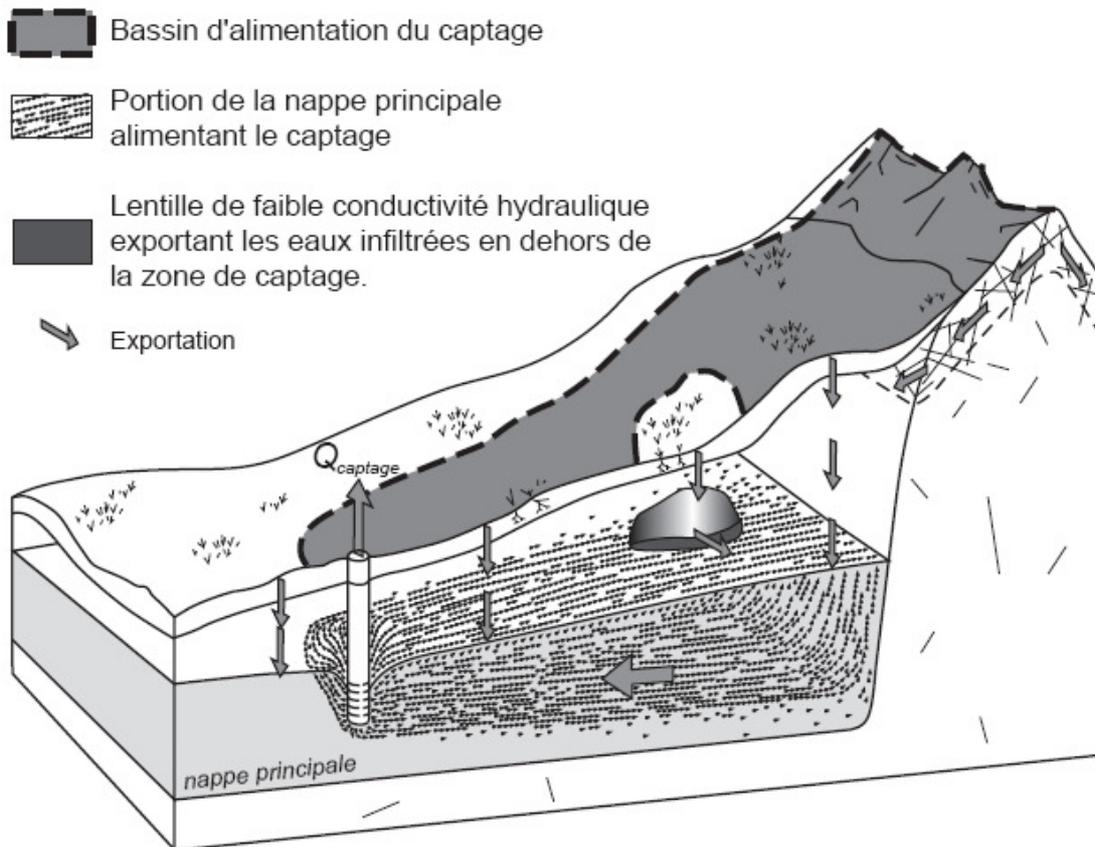


Illustration 6 - Illustration du bassin d'alimentation d'un captage. Il s'agit du secteur, en surface, qui participe à l'alimentation en eau du captage (in Bussard, 2005)

De manière analogue à ce qui est fait en hydrologie, la portion de la zone de bordure qui alimente le captage est fixée sur la base de critères topographiques et géologiques (Illustration 7)

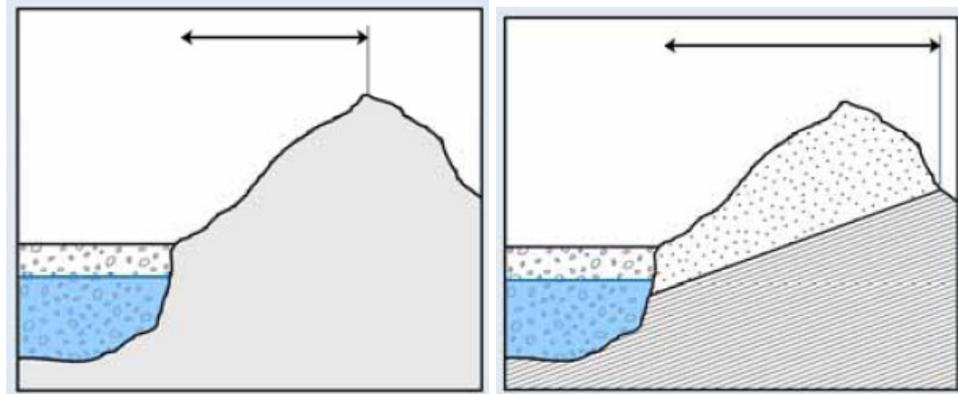


Illustration 7 – Détermination de la zone de bordure du bassin d'alimentation du captage sur la base de critères topographiques et géologiques

C'est le cas par exemple pour les aquifères alluviaux bordés par des terrains imperméables (Illustration 8) ou pour les systèmes karstiques binaires comprenant un aquifère karstique et un bassin de surface drainé par des pertes (Illustration 9). A l'inverse le BAC peut être de dimension plus réduite si la nappe est captive ou libre mais sous recouvrement argileux (Illustration 10).

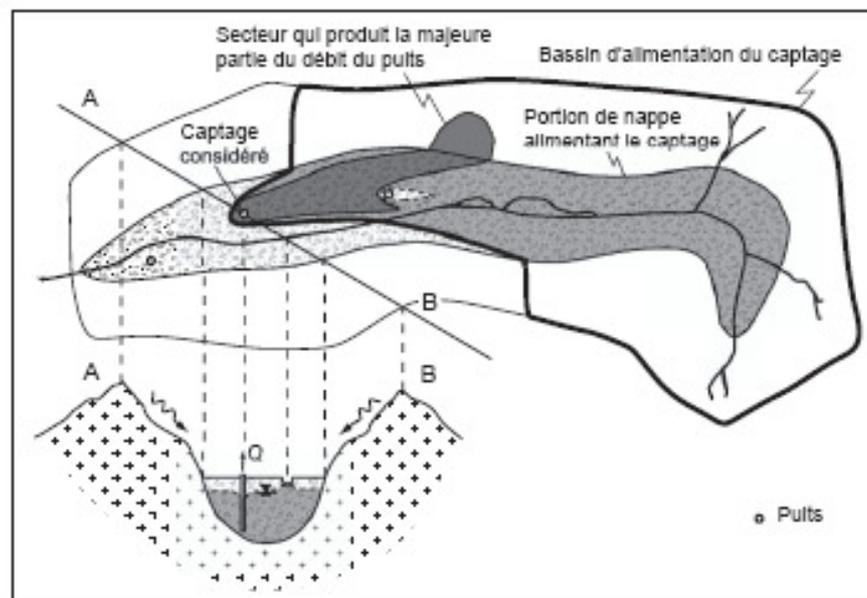


Illustration 8 – Exemple de bassin d'alimentation d'un captage dans un aquifère alluvial (in Bussard, 2005)

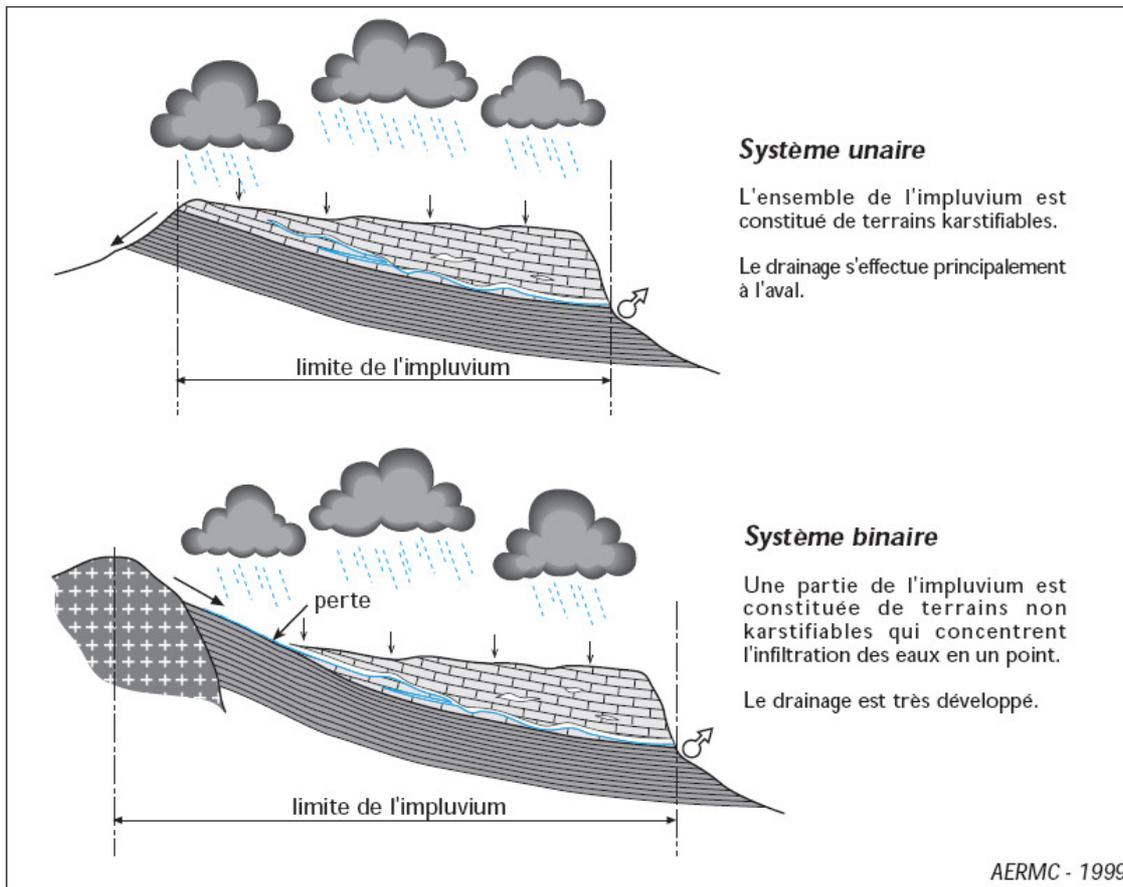


Illustration 9 – Alimentation des aquifères karstiques (in AERMC, 1999)

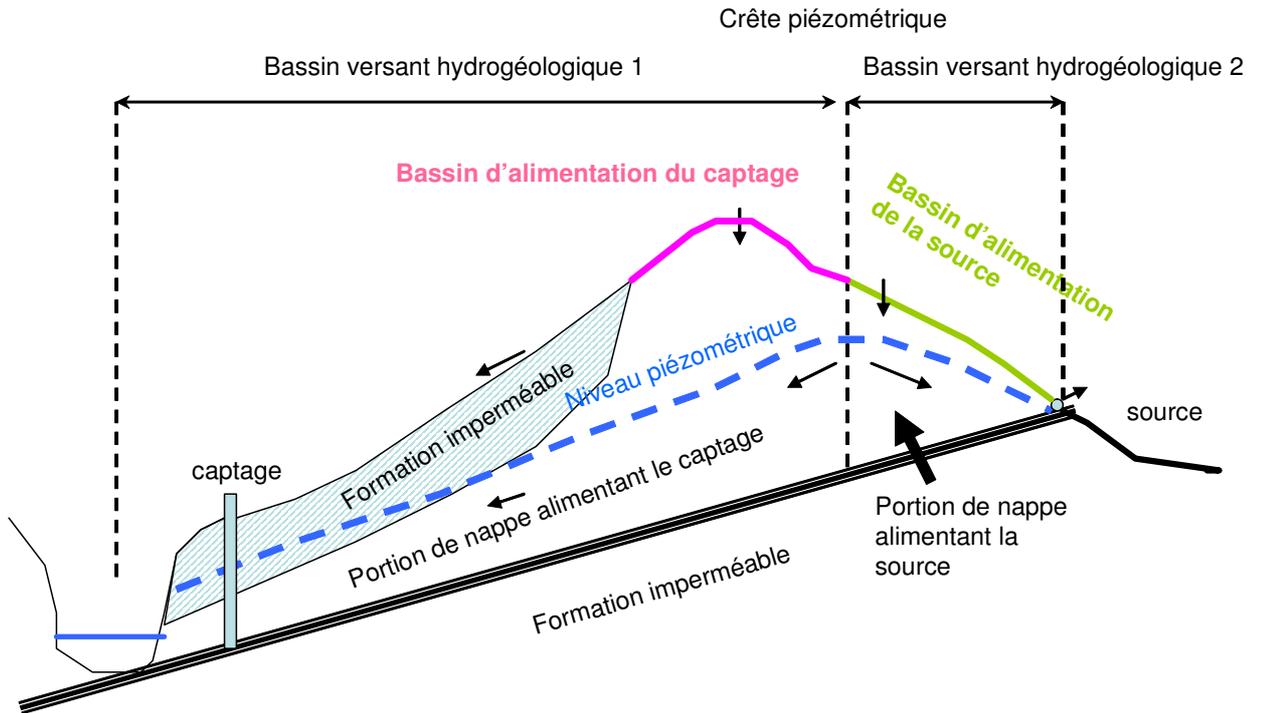


Illustration 10 – Exemple de bassin d'alimentation pour une nappe captive

Le bassin d'alimentation d'un captage en nappe captive doit également prendre en compte les flux de drainance avec la nappe généralement libre situé au dessus, ces flux (verticaux) pouvant être dans un sens ou dans l'autre. L'illustration 11 montre un exemple de système multi-couche à aquifère A semi-captif alimenté et débité par drainance à travers l'horizon semi-perméable C depuis ou vers l'aquifère libre C

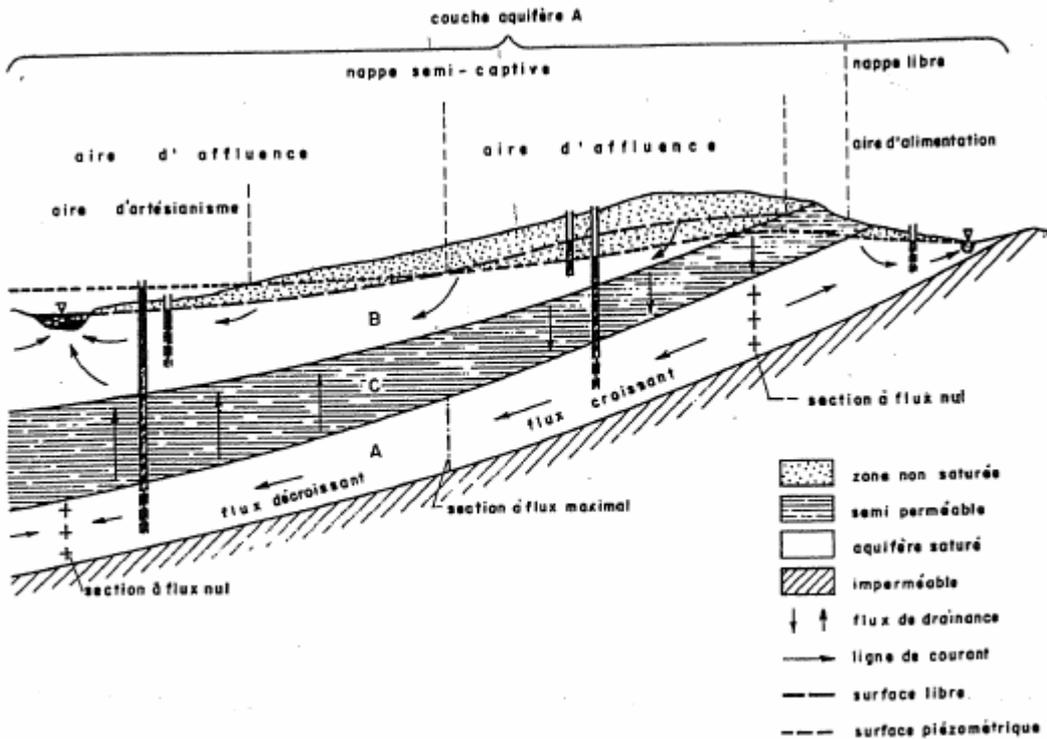


Illustration 11 - Exemple d'aquifère semi-captif à flux de drainance variable

1.3. PORTION DE NAPPE ALIMENTANT LE CAPTAGE, AIRE D'ALIMENTATION, ZONE D'INFLUENCE, ZONE D'APPEL

Dans le cas où le captage se situe à l'exutoire du bassin versant hydrogéologique (cas classique d'une source), la portion de nappe alimentant le captage peut être délimitée à partir des lignes de courant convergeant vers l'exutoire ; Elle est peu dépendante du **débit** du captage. Dans les autres cas, elle correspond aux lignes de courant qui sont détournées vers le captage en fonction du débit. La portion de nappe alimentant le captage ne doit pas être confondue avec la zone d'influence ou la zone d'appel du captage (Illustration 12).

La **zone d'influence** du captage correspond à la zone d'abaissement de la surface piézométrique lié au pompage.

La **zone d'appel** est la partie de la zone d'influence d'où provient l'eau captée. Sur cette zone, l'ensemble des lignes de courant se dirigent vers le puits ou le forage en pompage (Illustration 13).

La limite amont de la portion de nappe alimentant le captage peut être une **limite à potentiel imposé** (plan d'eau alimentant la nappe), une **limite à flux nul** (contact de

l'aquifère avec un imperméable) ou une **ligne de partage des eaux** (crête piézométrique).

Dans l'ouvrage de Lallemand-Barrès et Roux sur les périmètres de protection des captages, **l'aire d'alimentation du captage**, qui n'est pas défini en tant que tel, correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage. C'est la traduction du terme anglais « zone of contribution (ZOC) », terme figurant dans le guide de l'EPA de 1987.

Dans le dictionnaire d'hydrogéologie de Castany et Margat (1977), l'aire d'alimentation est le domaine dans lequel ont lieu les apports d'eau, continus ou temporaires qui alimentent une nappe, un aquifère défini, notamment un aquifère en partie captif, non alimenté sur toute son étendue. Une autre définition proposée est le lieu des origines des lignes de courant d'une nappe. Ces définitions s'appliquent à une nappe et non pas à un captage. Le dictionnaire mentionne l'aire d'alimentation d'une source, d'un captage ou d'un puits exploité comme l'aire dans laquelle s'effectue l'alimentation de la partie d'une nappe dont l'écoulement aboutit à un exutoire défini. Enfin le terme de bassin d'alimentation est proposé comme « vieux » synonyme d'aire d'alimentation (Boussinesq, 1905).

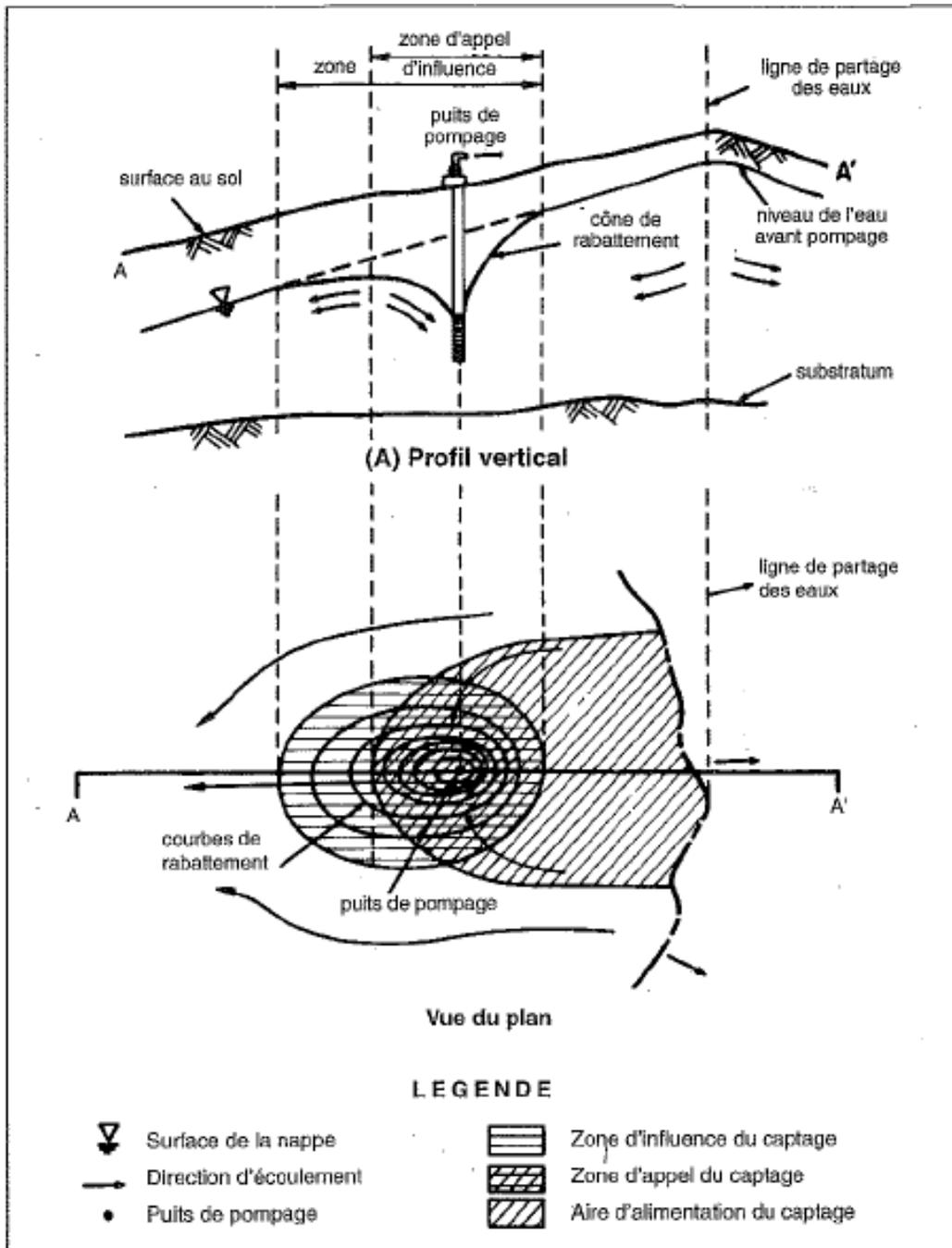


Illustration 12 - Zone d'appel, zone d'influence et aire d'alimentation d'un captage (Lallemand-Barrès et Roux, 1999)

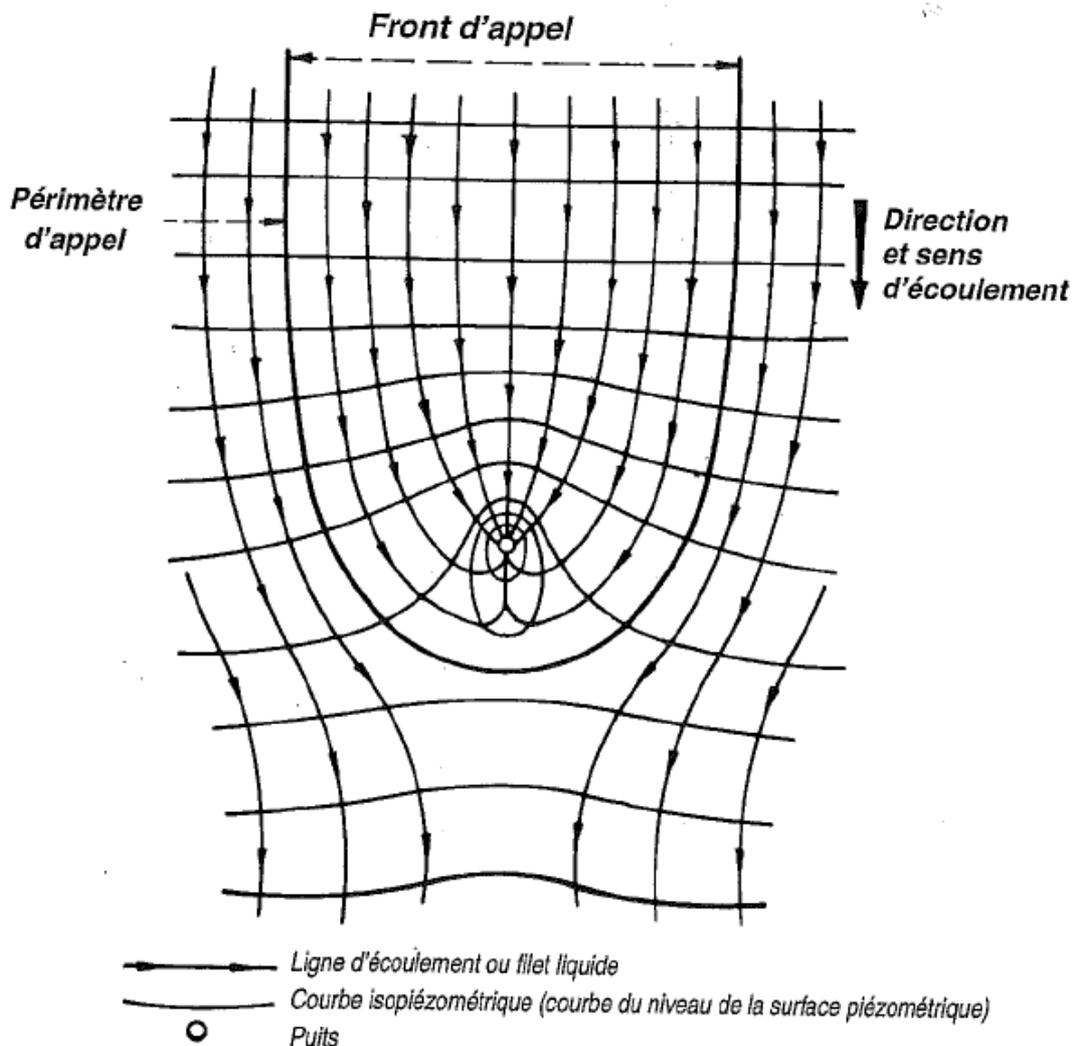


Illustration 13 – Zone d'appel créée par un pompage

Les Suisses ont introduit la notion de « **aire d'alimentation Z_u** » dans leur législation lorsque l'ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux est entrée en vigueur. L'aire d'alimentation Z_u fait partie des mesures prises sur le plan de l'organisation du territoire pour protéger les eaux souterraines. Elle est utilisée de manière ciblée pour lutter contre les pollutions diffuses. Elle couvre la zone où se reforment environ 90% des eaux du sous-sol alimentant un captage. Lorsque la détermination de la zone exige un travail disproportionné, l'aire d'alimentation Z_u couvre tout le bassin d'alimentation du captage (OFEFP, 2004).

Par la suite, pour rester en cohérence avec les travaux de l'OFEFP dont nous nous sommes fortement inspirés, nous considérons que les termes « aire d'alimentation d'un captage » et « bassin d'alimentation d'un captage » sont synonymes. Par ailleurs nous

avons élargi la définition usuelle du bassin d'alimentation de captage assimilé jusqu'ici à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage.

1.4. BASSIN D'ALIMENTATION D'UNE SOURCE ET D'UN CAPTAGE

Pour un captage donné, l'étendue de son bassin d'alimentation peut varier en fonction de deux critères : la variation de la surface piézométrique entre les hautes eaux et les basses eaux (Illustration 23) et le débit d'exploitation du captage qui va influencer l'extension de la zone d'appel (Illustration 14).

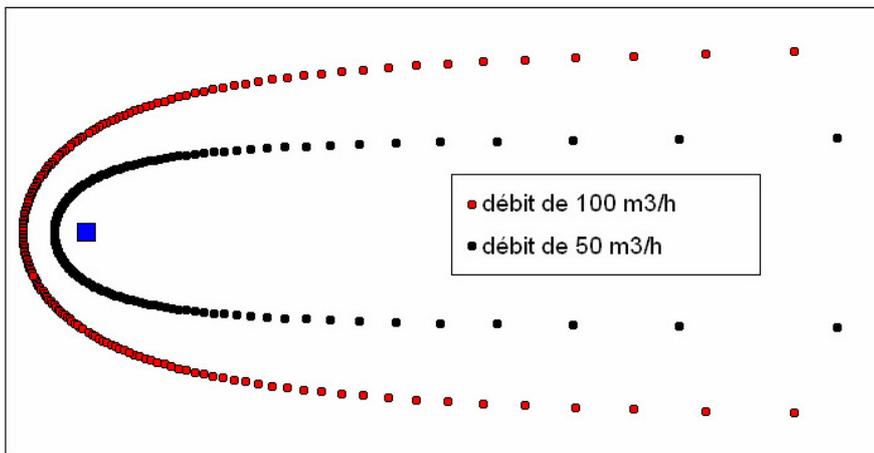


Illustration 14 – Effet du débit sur la portion de nappe alimentant le captage

Dans le cas d'un captage exploitant un aquifère d'extension régionale, la portion de nappe alimentant le captage peut être d'une taille nettement inférieure à celle du bassin versant hydrogéologique ; c'est le cas pour la nappe de Beauce, la nappe de la craie, la nappe de l'Eocène moyen et inférieur ou la nappe du Calcaire de Champigny. Pour la nappe de Champigny par exemple, la partie centrale de l'aquifère (secteur de l'Yerres) correspond à un bassin versant hydrogéologique de 700 km², alors que la portion de nappe alimentant le captage fait au plus quelques dizaines de km² (Illustration 15). Notons néanmoins que ces délimitations ont été faites en utilisant des une méthode analytique simple (méthode de Wyssling) qui a tendance sous-estimer l'extension de la portion de nappe alimentant le captage.

A l'inverse les bassins d'alimentation des trois groupes de sources captées de Provins représentent de 194 km² soit les deux tiers du bassin versant souterrain (bassin de Provins) qui couvre une superficie de 273 km². Leur délimitation correspond à celle des bassins versants de surface (illustration 16).

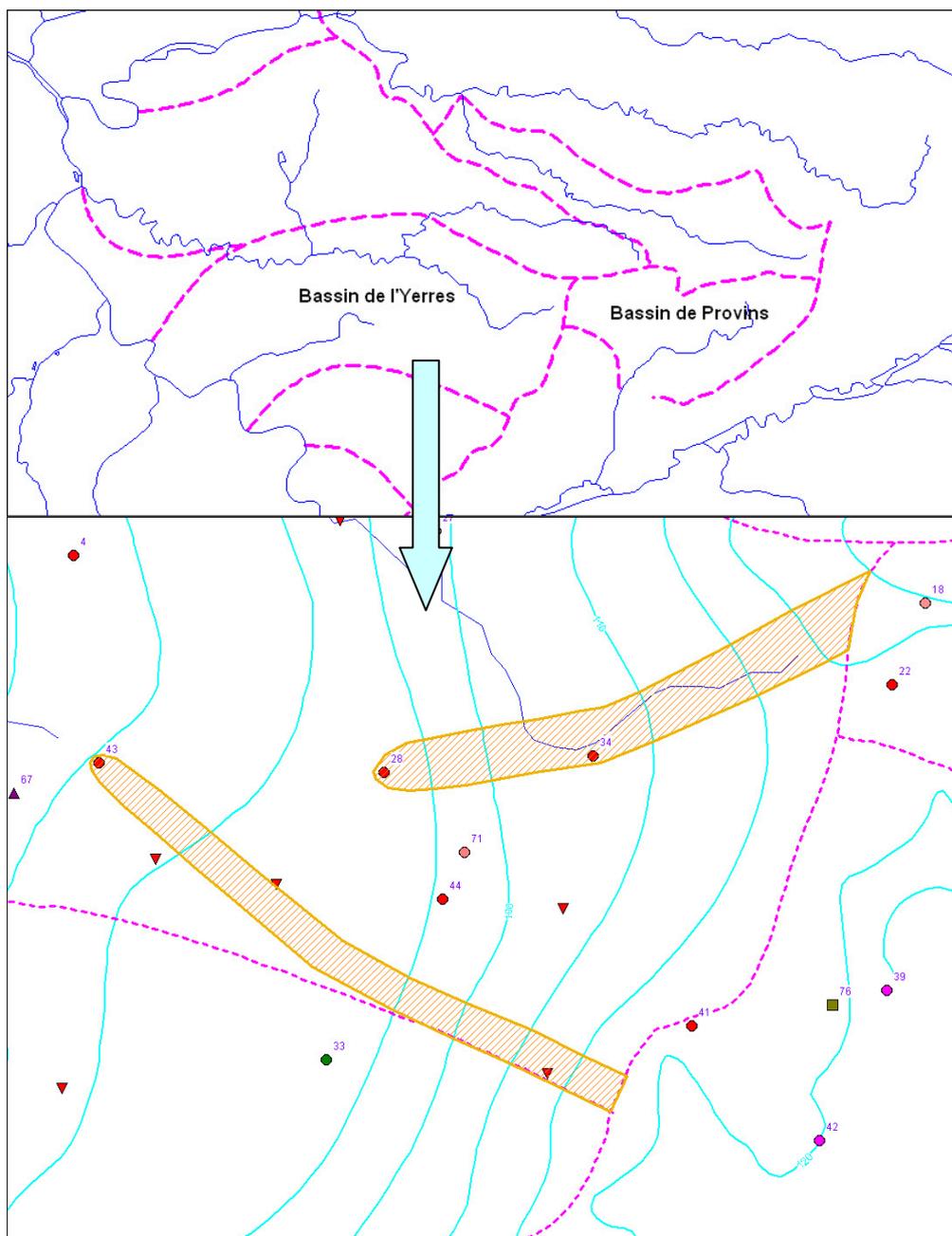


Illustration 15 – Délimitation de bassins d'alimentation de captage par méthode analytique dans la nappe du Calcaire de Champigny⁴ (d'après Vernoux et Martin, 2001)

⁴ L'exemple présenté sur la figure montre des délimitations simplifiées faites en utilisant une formule analytique (cf. 2.1.2) et indépendamment des autres captages. Dans la pratique, il faudrait tenir compte de l'influence des autres pompages

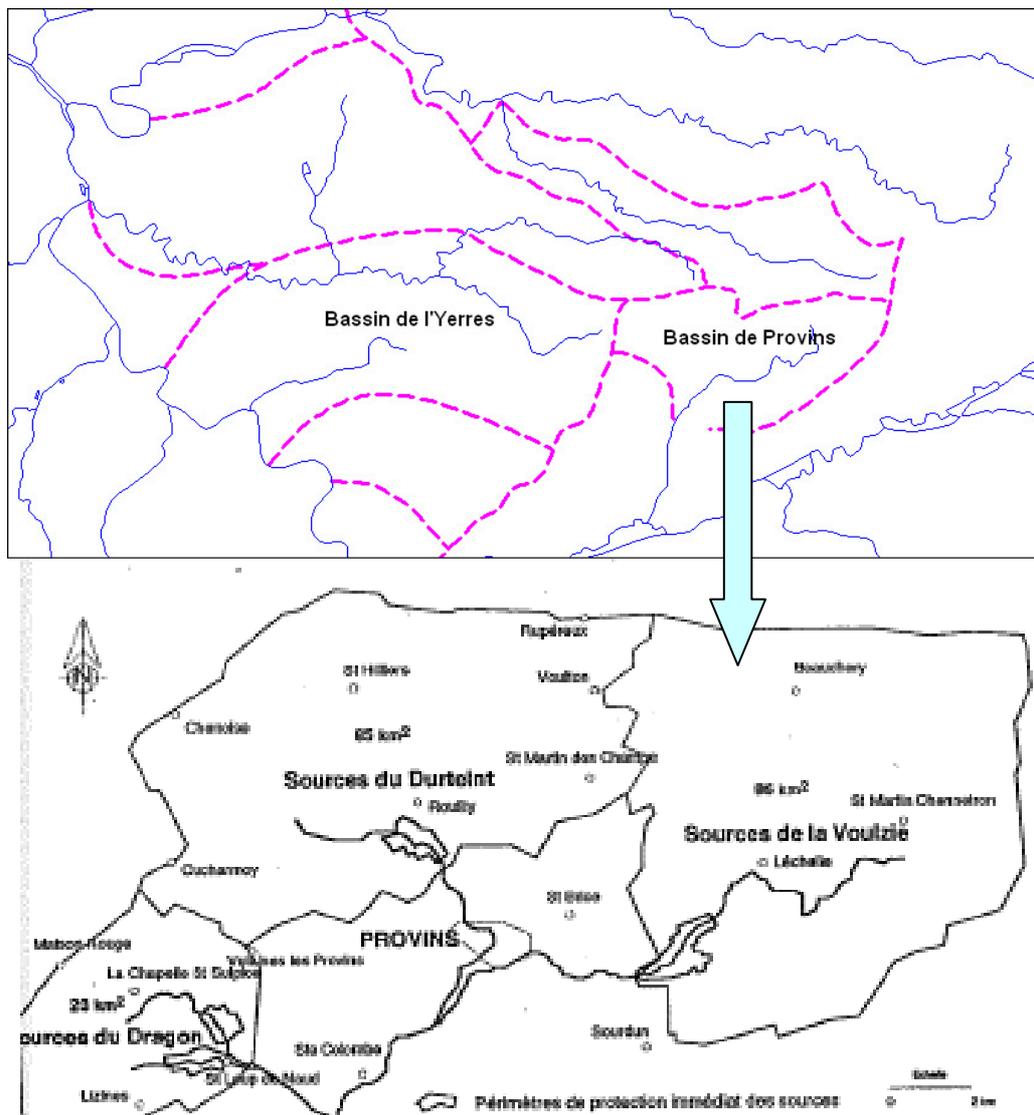


Illustration 16– Délimitation de bassins d'alimentation de captage par la méthode des limites topographiques dans la nappe du Calcaire de Champigny (d'après IAURIF, 1996)

1.5. AIRE D'ALIMENTATION ET PERIMETRE DE PROTECTION D'UN CAPTAGE

D'un point de vue réglementaire, il convient de distinguer deux notions : l'aire d'alimentation du captage et le périmètre de protection du captage. Ces deux types de surface sont des zones établies par les pouvoirs publics dans le but de protéger la ressource (Illustration 18).

La mise en place des périmètres avec leurs servitudes s'avère être une démarche efficace pour la réduction des risques de type accidentel et des pollutions ponctuelles pouvant affecter la qualité des nappes libres. En effet la superficie de la zone protégée est au maximum de quelques centaines d'hectares et couvre de fait rarement l'ensemble du bassin d'alimentation du captage, qui peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres carrés. Il n'en est pas de même en ce qui concerne les pollutions diffuses.

Le périmètre de protection

Obligatoire depuis la loi sur l'eau de 1964, il concerne en général un périmètre plus restreint que l'aire d'alimentation du captage. « L'acte portant déclaration d'utilité publique des travaux de prélèvement d'eau destinée à l'alimentation humaine détermine autour du point de prélèvement un périmètre de protection immédiate (environnement proche) dont les terrains sont à acquérir en pleine propriété, un périmètre de protection rapprochée à l'intérieur duquel peuvent être interdits ou réglementés toutes activités et tous dépôts ou installations de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux et, le cas échéant, un périmètre de protection éloignée à l'intérieur duquel peuvent être réglementés les activités, installations et dépôts ci-dessus mentionnés »⁵ (Illustration 17).

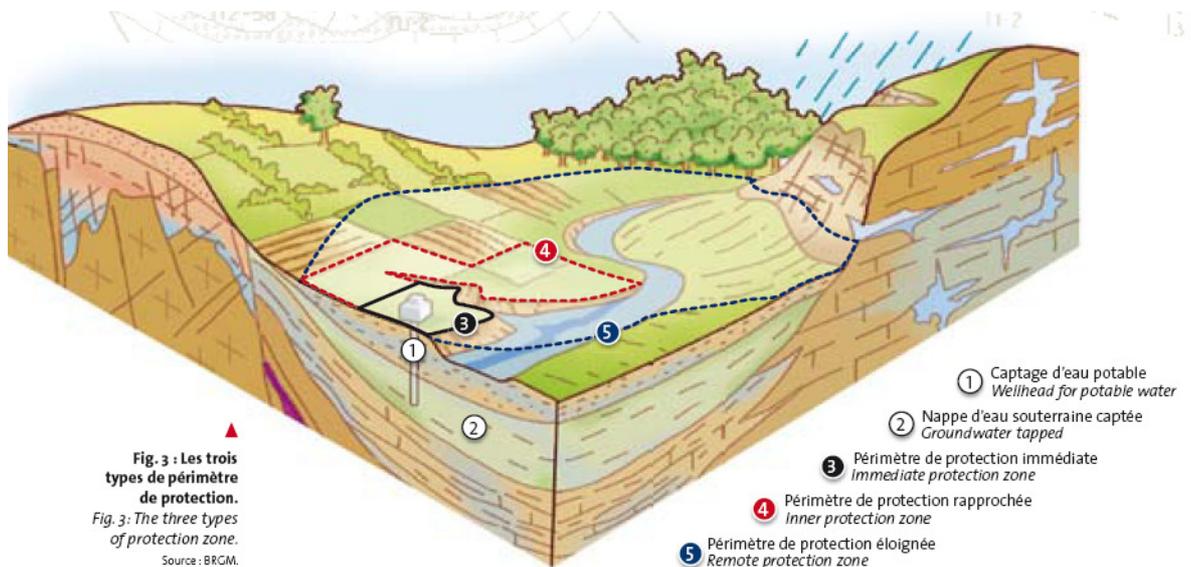


Illustration 17 - Les trois types de périmètres de protection (Pennequin et al., 2007)

⁵ extrait de l'article L. 1321-2 du code de la santé publique

L'aire d'alimentation du captage

Le terme « aire d'alimentation des captages d'eau potable » apparaît pour la première fois dans la version 03 de l'article L211-3 du code de l'environnement, entré en vigueur le 31/12/2006.

Au sein de l'aire d'alimentation du captage, le préfet peut identifier une zone dans laquelle sera instauré un programme d'actions visant à protéger la ressource. Ce programme d'actions est mis en œuvre sur une base volontaire par les agriculteurs et peut être financé pour partie les premières années. Le préfet peut le rendre obligatoire si les résultats attendus en terme de souscription par les agriculteurs ne sont pas obtenus.

Les périmètres de protection sont déterminés à l'issue d'une étude hydrogéologique. Ils doivent théoriquement être à l'intérieur du BAC, mais dans la pratique ils peuvent être de taille très différente par rapport à celle du BAC. Une étude des BAC des 124 captages prioritaires vulnérables aux pollutions diffuses de la région Poitou-Charentes aboutit à des surfaces cumulées de BAC de 2324 km² alors que les surfaces cumulées des périmètres de protection représentent 765 km² (DRASS – DIREN Poitou-Charentes, 2001)

Dans certains pays, le périmètre de protection éloigné peut correspondre à l'ensemble du BAC. C'est le cas au Québec par exemple et dans plusieurs pays d'Europe. En France le périmètre de protection éloigné n'ayant pas de caractère obligatoire et en l'absence de règles pour sa délimitation, il peut couvrir une superficie très variable. L'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse préconise qu'en milieu karstique le périmètre de protection éloignée soit toujours calé sur les limites du bassin d'alimentation du captage (AERMC, 2005).

	Aire d'alimentation du captage	Périmètres de protection du captage immédiat et rapproché
Base juridique	Article L. 211-3-5 du code de l'environnement Articles R.114-1 à R.114-5 du code rural en cours de modification	Articles L. 1321-2 ; R. 1321-13 du code de la santé publique
Etendue	Généralement : périmètre plus vaste par rapport au PPC	Généralement quelques hectares
But	Lutte contre les pollutions diffuses	Protection contre les pollutions ponctuelles et accidentelles
Moyens d'action	Programme d'actions (financé si besoin les premières années)	Prescriptions et indemnisations
Application	A l'initiative du préfet, qui a la possibilité de rendre les mesures du programme d'actions obligatoires	Systématique et obligatoire pour tous les captages

Illustration 18 – Distinction entre périmètre de protection et aire d'alimentation

Les délimitations des périmètres de protection rapprochés sont généralement faites à partir des isochrones (courbes d'égal temps de transfert). Les Suisses ont défini un secteur de protection nommé aire Z_u , défini comme l'aire qui couvre la zone où se reforme, à l'étiage, environ 90% des eaux du sous-sol pouvant être prélevées au maximum par un captage. Lorsque la détermination de la zone demande un travail disproportionné, l'aire Z_u couvre tout le bassin d'alimentation du captage. L'illustration 19 montre les procédures en vigueur en Europe et en Amérique du Nord.

Régions	Protection immédiate	Protection rapprochée	Protection éloignée		Référence		
Amérique du Nord	Québec	30 m	60 jours, > 100 m		(MEF, 1995)		
	Colombie Brit.		1 année		(BCMELP, 2000)		
	USA	> 30 m (Z I)	> 50 jours, > 150 m (Z II)	Bassin d'alim. (Z III)		(USEPA, 1987)	
Europe	Angleterre		50 jours, > 50 m (Z I)	400 jours, 25 % du bassin d'alim (Z II)	Bassin d'alim. (Z III)	(Harris, 2001)	
	Allemagne	10 m (Z I)	50 jours (Z II)	2000 m (Z IIIA)	Bassin d'alim. (Z IIIB)	(Gramel et Urban, 2001)	
	Danemark	10 m	300 m	ZP spécifique au site basée sur une cartographie de la vulnérabilité	Bassin d'alim.	(Thomsen et al., 2004)	
	France	environ 15 m	environ 50 jours	ZP non obligatoire, elle peut couvrir une surface très variable		(Office International de l'Eau, 2000)	
	Belgique	10 m	1 jour ou 35 m autour d'un puits, 25 m de part et d'autre de l'axe d'une galerie	50 jours ou 1000 m pour un aquifère de fissures ou karstique, 500 m pour un aquifère graveleux, 100 m pour un aquifère sableux		(Gouvernement Wallon, 1992)	
	Pays-Bas	30 m	60 jours	10 ans, > 800 m	25 ans, > 1200 m	Bassin d'alim.	(USEPA, 1987)
	Suisse	10 m (S1)	10 jours, > 100 m (S2)	Extension double de la S2 (S3)		aire Zu: zone qui contribue à env. 90% du débit capté	(OFEFP, 2004)

Illustration 19 – Synthèse des procédures nationales de protection des eaux souterraines (in Bussard, 2005)

1.6. VULNERABILITE DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE

La **vulnérabilité** est le « défaut de protection ou de défense naturelle de l'eau souterraine contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales. » (définition du CNFSH). Cette définition renvoie à la capacité d'une particule d'eau située à la surface du sol à rejoindre l'aquifère dans sa partie saturée en eau.

Il est important de distinguer la **vulnérabilité intrinsèque** – pour laquelle on ne présage pas de la nature des polluants – de la **vulnérabilité spécifique** à un polluant en particulier ou à un groupe de polluants. Cette dernière prend en compte les propriétés des polluants et leur capacité à interagir avec les différents composants de la vulnérabilité intrinsèque (le sol notamment). On retiendra donc que la vulnérabilité intrinsèque est indépendante du polluant.

La vulnérabilité est une notion considérée comme indépendante dans le temps, ce qui revient à dire que sur la période considérée, les conditions de protection des eaux souterraines – du sol à la surface de la nappe – ne changent pas.

Enfin, la vulnérabilité est définie pour un milieu en particulier (eaux de surface, le sol (érosion), un aquifère) et elle doit donc être estimée indépendamment des autres milieux. Il convient de distinguer la vulnérabilité des autres notions suivantes :

Aléa : il s'agit de l'application d'un stress (une action polluante par exemple) sur un point, un axe ou un espace plus ou moins vulnérable du milieu naturel. Dans notre cas, le milieu considéré est celui des eaux souterraines. Un aléa suppose une approche probabiliste.

$$\text{Aléa} = \text{pression polluante} \times \text{vulnérabilité}$$

Enjeu : cela correspond à la cible qui est susceptible d'être – et ne doit pas – être atteinte par les effets d'un stress sur le milieu naturel.

Dans le cas de notre étude, l'enjeu est un ou plusieurs captage(s) d'eau potable.

Risque : le risque de pollution résulte du croisement d'un ou plusieurs aléa(s) et d'un ou plusieurs enjeu(x).

$$\text{Risque} = \text{Aléa(s)} \times \text{Enjeu(x)}$$

La cartographie du risque pour un polluant est donc obtenue en croisant :

- une carte de vulnérabilité ;
- une carte des pressions de pollution ;
- une carte des enjeux.

Compte tenu de la nature anthropique des enjeux et des pressions de pollution, le risque est une notion évolutive dans le temps.

2. Méthodes de délimitation des bassins d'alimentation des captages et des zones contributives à cette alimentation

Il faut distinguer la délimitation proprement dite des bassins d'alimentation de la délimitation de zones de protection contre les pollutions diffuses à l'intérieur du bassin d'alimentation.

Les premières méthodes de délimitation ont été proposées par l'USEPA (Agence de Protection Environnementale des Etats-Unis) dans le cadre de la mise en place des périmètres de protection des captages. L'USEPA a élaboré un guide pour la délimitation des périmètres de protection des captages (USEPA, 1987) ainsi qu'un guide adapté aux milieux fracturés (USEPA, 1991) et un manuel sur la protection des captages et des eaux souterraines (USEPA, 1994)

Le guide de 1987 distingue 4 méthodes de délimitation :

- Les méthodes géométriques qui prennent en compte un rayon fixé arbitrairement ou un rayon calculé, basé sur le temps de transport d'un contaminant par rapport au débit soutiré d'un puits⁶,
- Les méthodes analytiques simples qui permettent de calculer les temps de transfert et les rabattements,
- La cartographie hydrogéologique qui permet de délimiter le bassin d'alimentation du captage, avec utilisation de traceurs pour les milieux fissurés et karstiques, et cartographie de la vulnérabilité,
- Les modèles numériques basés sur les équations d'écoulement et de transport de masse.

Ces méthodes ont été reprises et développées dans de nombreux travaux (USEPA, 1998), en France dans le guide méthodologique et réglementaire sur les périmètres de protection (Lallemand-Barrès et Roux, 1999) par les Suisses qui ont mis en place des mesures de protection des eaux souterraines contre les pollutions diffuses (Parriaux et Bussard, 2002). L'annexe 1 présente une méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants (Bussard, 2005).

⁶ Les méthodes des rayons présentées dans le guide de l'USEPA n'ont pas été reprises dans la présente étude. Les résultats de ces méthodes sont non représentatifs des conditions naturelles.

2.1. DELIMITATION DU BASSIN D'ALIMENTATION DU CAPTAGE

La délimitation du bassin d'alimentation se fait par l'extension en surface de la portion d'aquifère alimentant le captage (Illustration 6). Elle nécessite en premier lieu l'identification des systèmes d'écoulement.

Les méthodes de délimitation de la portion de nappe qui alimente le captage tendent à répondre à la question : une particule d'eau située en un endroit quelconque de la zone saturée de l'aquifère terminera-t-elle sa course dans le captage ?

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des limitations, ces dernières étant principalement liées à des hypothèses simplificatrices sur la structure et le fonctionnement de l'aquifère.

D'une manière générale, la portion de la nappe qui alimente le captage dépend de critères structuraux et hydrodynamiques et dans certains cas du débit de pompage. Ainsi, selon le type d'aquifère, l'un ou l'autre de ces critères peut prédominer, et on aura recours à des méthodes différentes pour délimiter la portion qui alimente le captage. :

- Méthode des limites structurales (étude géologique et hydrogéologique)
- Méthode hydrodynamique graphique
- Méthodes analytiques
- Modèles numériques
- Méthodes complémentaires (traçages, hydrogéochimie)

Ces méthodes ne sont cependant pas exclusives et il est même recommandé de les mettre en œuvre simultanément.

Quant à l'extension du bassin d'alimentation, elle est basée sur l'élaboration d'un modèle conceptuel de l'hydrologie et de l'hydrogéologie régionale.

La surface du bassin d'alimentation ainsi défini peut être vérifiée à partir d'un bilan hydrogéologique

2.1.1. Identification des systèmes d'écoulement

La caractérisation du système aquifère et des conditions d'écoulement est la première étape indispensable pour la délimitation du bassin d'alimentation du captage ; elle fournira également des éléments pour la détermination des zones contributives et la caractérisation de la vulnérabilité.

Cette première phase doit permettre d'identifier les systèmes d'écoulements qui peuvent communiquer entre différents réservoirs. Un exemple classique sur le bassin Seine-Normandie est l'alimentation des nappes alluviales par la nappe de la craie (Illustration 20).

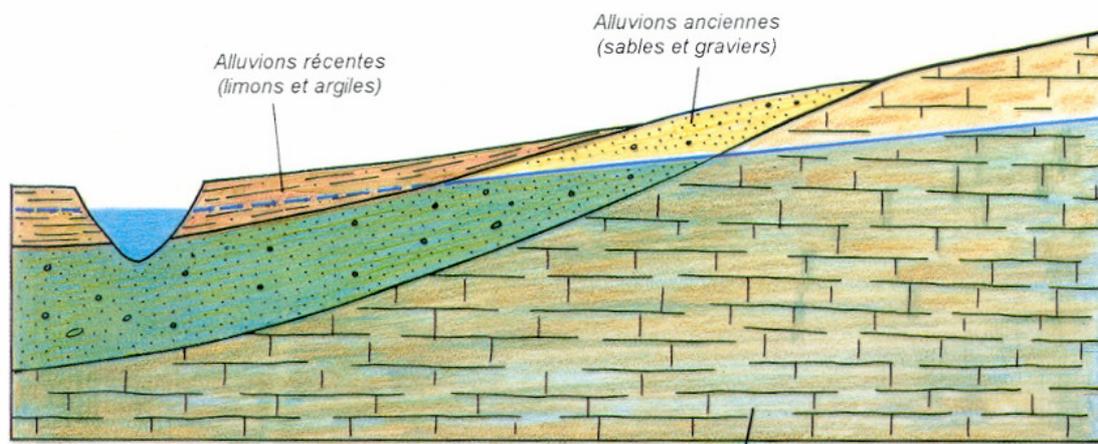


Illustration 20 - Exemple de communication entre la craie et les alluvions

L'étude de caractérisation du système aquifère peut être plus ou moins longue et coûteuse selon les données dont on dispose et la complexité du système.

Ces diverses activités de caractérisation entraînent des coûts, mais elles permettent de déterminer avec une justesse croissante les limites de l'aire d'alimentation d'un point de captage d'eau souterraine. Comme les milieux géologiques ne peuvent pas être connus de façon complète, une marge d'incertitude plus ou moins importante affecte toujours l'estimation de l'aire d'alimentation d'un point de captage. La marge d'incertitude tolérable dans la détermination de l'aire d'alimentation d'un point de captage doit être proportionnelle à des enjeux tels que l'unicité de la ressource et les risques de contamination que présentent les utilisations du territoire. Ce sont ces enjeux qui dictent le degré d'exactitude approprié pour la caractérisation d'un aquifère. Cette caractérisation entraîne donc des décisions mettant en balance les coûts liés au développement des connaissances et les risques de contamination de la source d'approvisionnement en eau. Les prises de décision seront facilitées par des outils prenant en compte les multiples aspects de l'alimentation en eau potable à partir des eaux souterraines, notamment l'hydrogéologie, l'économie et la santé de la population.

Pour l'inventaire des méthodes et outils de caractérisation d'un système aquifère, qui est en dehors du cadre de cette étude, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages de base en hydrogéologie. Le document élaboré pour le compte du Ministère en charge de l'environnement du Québec (Rasmussen et al., 2006) brosse un panorama assez complet de ces outils. Nous développerons néanmoins un paragraphe spécifique sur les traçages dans la mesure où cette méthode est incontournable pour la délimitation des bassins d'alimentation en milieu karstique, et peut également être utilisée de façon avantageuse pour les aquifères en roches meubles et fissurées.

2.1.2. Portion de l'aquifère qui alimente le captage

Les méthodes énumérées ici permettent de déterminer la portion de l'aquifère qui alimente le captage. Les méthodes à appliquer dépendent avant tout du type d'aquifère. C'est en principe la combinaison de plusieurs méthodes qui permet la détermination la plus précise.

a) Méthode des limites structurales

La méthode des limites structurales consiste à délimiter le système aquifère à l'intérieur duquel circule l'eau souterraine. Les limites du système aquifère sont déterminées à partir de l'étude géologique et hydrogéologique. Ces limites sont tectoniques, sédimentaires ou d'altération. Il peut s'agir de failles mettant en contact le réservoir avec une formation imperméable, de limite d'extension de la formation géologique constituant l'aquifère, de changement de faciès (passage d'un sable à une argile), de changement de structure de la roche (passage d'une craie fracturée perméable à une craie compacte peu perméable).

En complément des cartes géologiques, les outils de géophysique sont particulièrement utiles pour visualiser la géométrie des structures du sous-sol.

Cette méthode est bien adaptée, en première approche, **aux sources à l'exutoire d'un bassin versant hydrogéologique et aux captages alimentés par un aquifère à porosité de fractures ou karstique**. Pour les sources, la portion de nappe alimentant le captage est alors équivalent au bassin versant souterrain. C'est ce qui a pu être montré sur la source des Brévilles à Montreuil-sur-Epte (Val d'Oise) ou le bassin d'alimentation du captage est délimité au nord et à l'est par une faille, au sud et à l'ouest par des crêtes piézométriques (Illustration 21).

La méthode structurale peut en particulier être basée sur la détermination de la topographie du substratum de l'aquifère. Elle permet d'avoir une idée des sens d'écoulement de la nappe en l'absence de données piézométriques. Cette méthode a par exemple été utilisée à Malte pour la détermination du bassin d'alimentation des sources de Wignacourt (Gutierrez, 1994). La méthode suppose que les perméabilités soient relativement homogènes pour que les flux souterrains soient proches de ceux créés par gravité vers le point le plus bas. Elle ne s'applique pas avec des nappes captives.

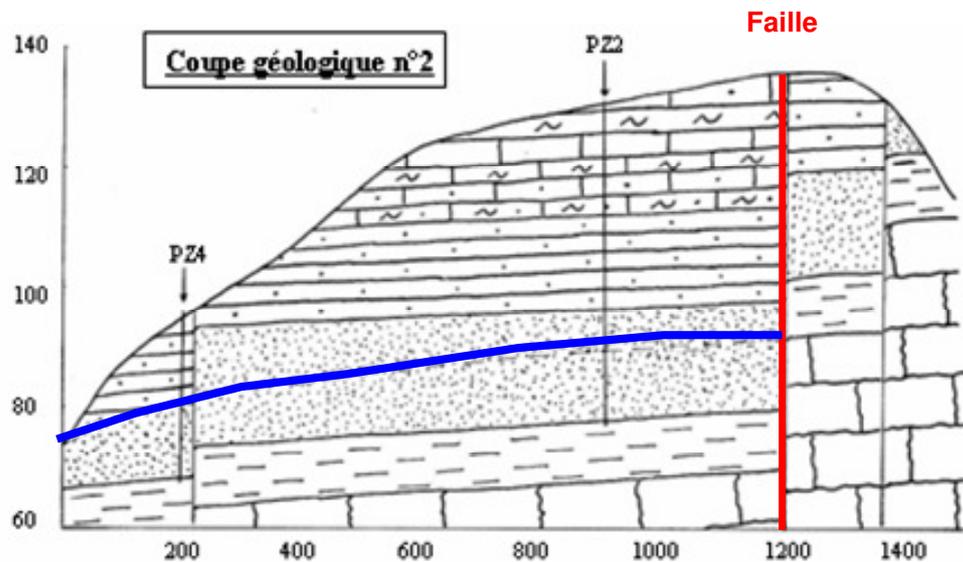
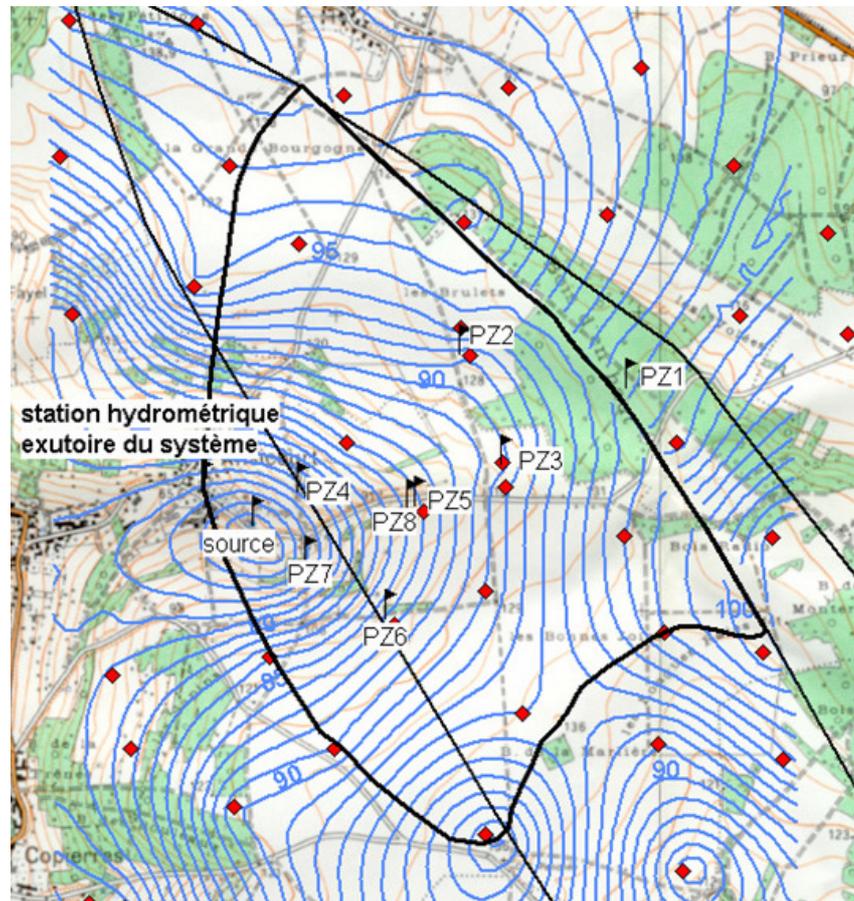


Illustration 21 - limites structurales du bassin d'alimentation de la source des Brévilles (coupe SO-NE)

b) Méthode hydrodynamique graphique

La méthode hydrodynamique graphique est basée sur un tracé de la surface piézométrique et des lignes de partage des eaux souterraines. Elle n'est valable que dans les cas où la conductivité hydraulique (perméabilité) est isotrope, ce qui est le cas des aquifères poreux mais rarement celui des aquifères fissurés et encore moins karstiques. Dans les aquifères en roches fissurées, l'anisotropie dépend de l'orientation et du nombre de réseaux de fissures. Si le milieu comporte de nombreux réseaux qui couvrent la majorité des directions, la conductivité peut être considérée à grande échelle comme isotrope. En revanche, s'il ne contient que quelques réseaux ou s'ils suivent tous une ou des directions préférentielles, elle sera anisotrope. Il est donc nécessaire d'étudier l'agencement structural des discontinuités du massif. Dans les aquifères karstiques, la conductivité hydraulique est d'une manière générale anisotrope, car les écoulements suivent principalement le réseau karstique qui est anisotrope.

La méthode est, par conséquent, bien adaptée aux captages en **domaine alluvial et sédimentaire non karstique** (Illustration 22). Mais il est souvent difficile de déterminer graphiquement leur zone d'appel, à moins de disposer de nombreux piézomètres à proximité du captage, ce qui reste assez rare. Il est donc **souvent utile de compléter la méthode graphique par la méthode analytique pour les abords du captage**.

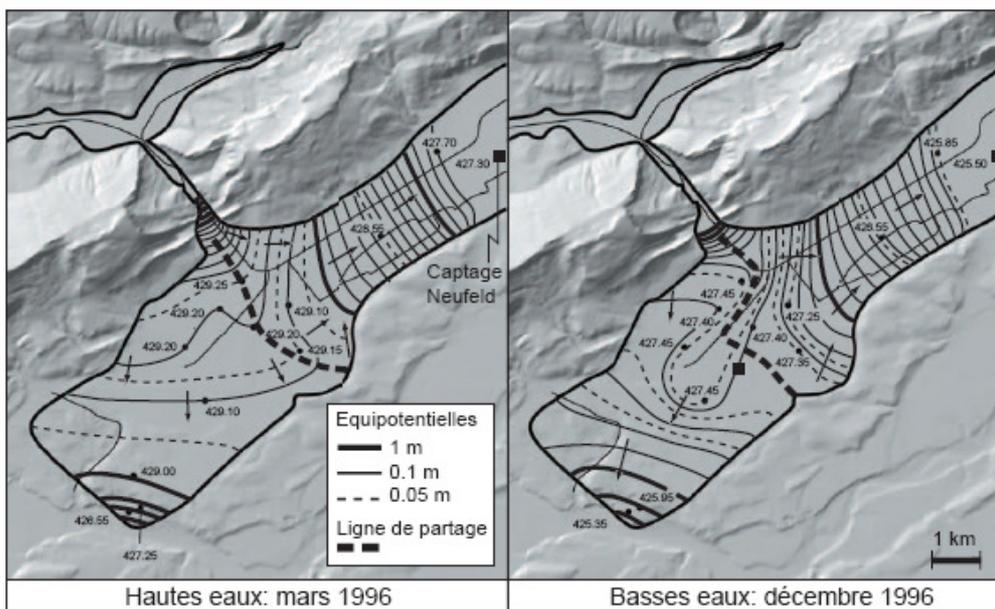


Illustration 22 - Exemple d'application de la méthode graphique en domaine alluvial par détermination de la ligne de partage des eaux (in Bussard, 2005)

Elle peut être utilisée sans le recours à d'autres méthodes dans le cas d'une source située à l'exutoire du bassin versant souterrain à condition de disposer d'une carte piézométrique précise, à la fois en hautes eaux et en basses eaux. C'est ce qu'illustre l'encadré ci-dessous.

Exemple de cartographie automatique du bassin d'alimentation d'une source

Dans le cadre d'une étude pour un syndicat d'AEP d'Indre-et-Loire (Gutierrez et al., 2003), le BRGM a délimité le BAC en utilisant une méthode de cartographie automatique. Il a été choisi de dessiner le bassin hydrogéologique correspondant aux écoulements naturels, contrôlés par un exutoire (les sources d'Avon) situé à 200 m des captages.

La délimitation a été réalisée sur la base de quatre cartes piézométriques comprenant chacune plus de 100 mesures de niveau réalisées en hautes et basses eaux 2002 (Illustration 23). Il représente une superficie de 18 km². Cette surface correspond en réalité à l'enveloppe des bassins de dimension plus réduite correspondants aux états de hautes eaux et de basses eaux. Le bassin versant hydrogéologique apparaît franchement décalé par rapport au bassin versant topographique de taille plus modeste (4,9 km²). La principale cause de cet écart réside dans la structure des couches géologiques et l'hétérogénéité des perméabilités de l'aquifère. Le caractère karstique de l'aquifère est souligné.

Les étapes de cartographie sont les suivantes :

- tracé manuel des isopièzes en tenant compte des limites à potentiel imposé
- interpolation par krigeage des cartes piézométriques pour générer des grilles
- délimitation des bassins d'alimentation par traitement des grilles sous Arcview

La méthode est généralisable à tout bassin d'alimentation d'une source car indépendante du débit pompé. Elle ne s'applique pas à un pompage générant une zone d'appel. Dans ce cas il faut utiliser les méthodes analytiques ou numériques (cf. paragraphes suivants)

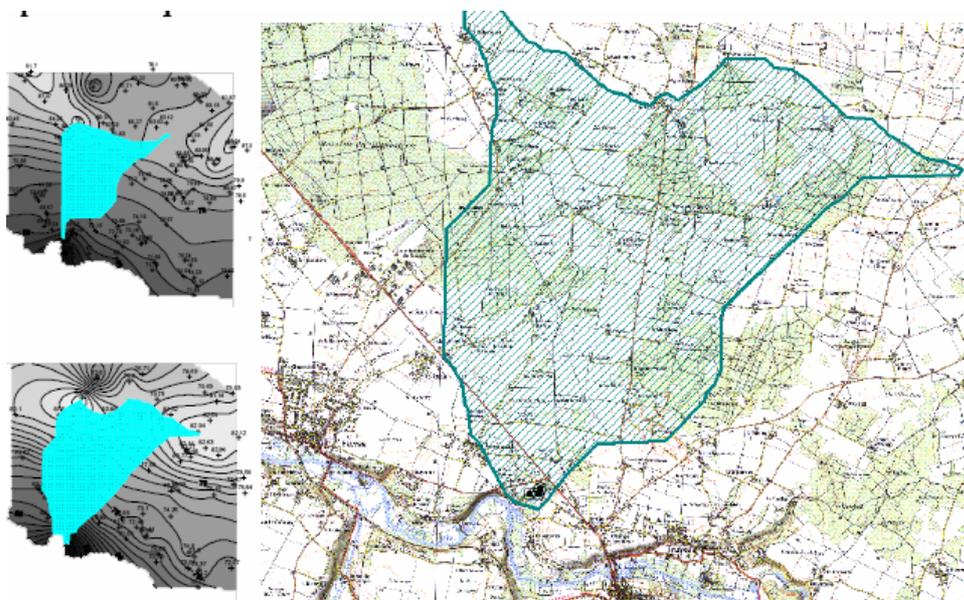


Illustration 23 - Délimitation d'un BAC par cartographie automatique
Les deux cartes de gauches représentent les surfaces piézométriques en HE et BE

c) Méthodes analytiques

Les fondements mathématiques de ces méthodes se trouvent dans Bear et Jacob (1965) qui ont montré que dans un aquifère idéal avec un écoulement naturel uniforme, la zone d'appel prend une forme parabolique en U. On peut calculer le point de stagnation en aval (x_L) et la demi-largeur maximale en amont (y_L) (Illustration 24).

Le seul phénomène pris en compte est la **convection**. Il s'agit d'une méthode bidimensionnelle, et la recharge n'est pas considérée dans les calculs. Le puits est vertical, unique et totalement pénétrant, et il pompe sur toute l'épaisseur saturée de l'aquifère. Le régime permanent est supposé atteint. L'aquifère peut être assimilé à un **milieu poreux infini** (c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'influence de conditions aux limites sur le pompage), **isotrope** et **homogène**. Selon les hypothèses énoncées précédemment, il est possible de déterminer de façon analytique l'enveloppe de la portion de nappe alimentant le captage.

Les détails de cette méthode, déclinée en plusieurs variantes selon la nature du problème à résoudre sont fournis en annexe 3. Les points (x,y) de la courbe peuvent être calculés en coordonnées radiales ou cartésiennes.

Pour tenir compte des variations de la direction de l'écoulement régional, on combine souvent les méthodes analytique et graphique. L'illustration 25 montre le résultat du calcul de l'aire d'alimentation pour deux valeurs de débit (300 m³/h et 55 m³/h), tracée en tenant compte de la variation des directions d'écoulement en particulier dans la partie la plus en amont du captage

En nappe captive:

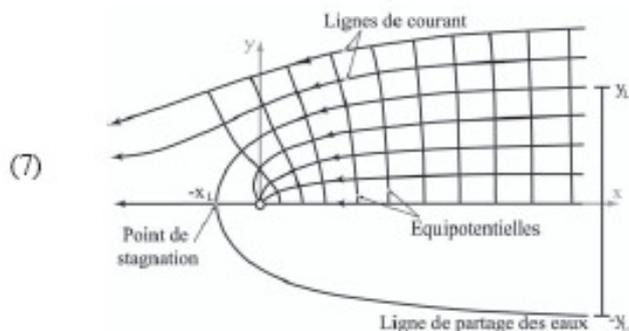
$$x_L = \frac{Q}{2\pi \cdot b \cdot K \cdot i}$$

$$y_L = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot K \cdot i}$$

En nappe libre:

$$x_L = \frac{Q \cdot L}{\pi \cdot K \cdot (h_1^2 - h_2^2)}$$

$$y_L = \frac{Q \cdot L}{K \cdot (h_1^2 - h_2^2)}$$



Q : débit du puits [m³/s].

b : épaisseur de la tranche d'eau de l'aquifère [m].

K : conductivité hydraulique de l'aquifère saturé [m/s].

i : gradient hydraulique de la nappe: $i = (h_1 - h_2)/L$ [-].

h_1 et h_2 : charges hydrauliques amont et aval le long d'une ligne de courant avant la mise en pompage [m]. Ces charges ne sont pas mesurées à partir d'un repère géodésique, mais à partir du fond imperméable, supposé horizontal, de l'aquifère; ainsi $b = (h_1 + h_2)/2$.

L : distance horizontale entre ces points [m].

Illustration 24 – Ligne de partage des eaux induite par un puits dans un système d'écoulement uniforme – calcul du point de stagnation en aval (x_L) et la demi-largeur maximale en amont (y_L)

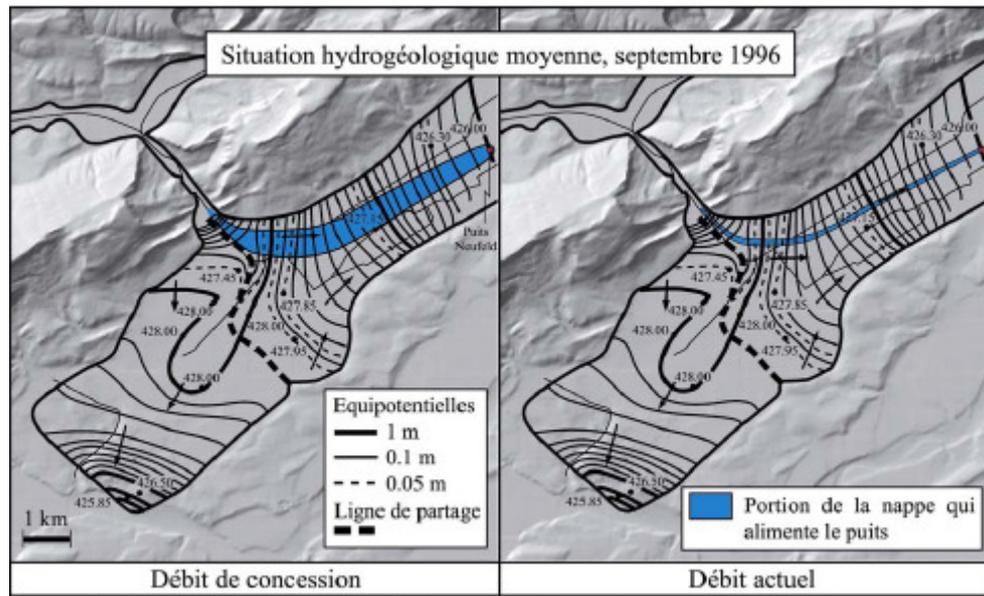


Illustration 25 - Approximation de la portion de la nappe qui alimente le puits Neufeld (SO) par combinaison des méthodes analytiques et graphiques, en considérant une situation hydrogéologique moyenne (in Bussard, 2005)

Cette méthode analytique peut être complétée par une approche stochastique permettant d'estimer l'incertitude sur le tracé de la zone d'appel en tenant compte de l'incertitude sur les paramètres de calcul

d) Modèles numériques

En raison des limitations des méthodes analytiques (milieu poreux homogène, isotrope et sans conditions aux limites détectables), l'utilisation des modèles numériques est de plus en plus répandue. Ils permettent en particulier de prendre en compte les **hétérogénéités de l'aquifère** (distributions de perméabilités, présence de cheneaux, failles, ...), la **dispersion** ou l'**interférence d'autres pompages**.

Avec l'utilisation de modèles numériques, il existe deux approches pour déterminer la portion de la nappe qui alimente un captage :

- Les **méthodes advectives** (convectives) qui ne tiennent compte que des flux hydrauliques et produisent un champ binaire de la probabilité P avec une zone de la nappe d'où une particule est censée rejoindre à coup sûr le captage ($P = 1$) et une zone d'où les particules ne peuvent pas le rejoindre ($P = 0$).
- Les **méthodes advectives/dispersives**, qui tiennent compte aussi de la dispersion et produisent un champ continu de P .

La délimitation de la portion de la nappe qui alimente le captage peut être assez différente selon la méthode employée (Illustration 26).

Les outils de modélisation sont présentés en annexe 3, en distinguant des outils dédiés à la délimitation des aires d'alimentation, simples d'utilisation (ASMWIN, WhAEM) et des outils de modélisation hydrodynamique et de transport plus complexes à mettre en œuvre (MARTHE, MODFLOW, ...)

Le logiciel ASMWIN semble bien adapté à la délimitation des BAC, simple d'utilisation tout en possédant des fonctionnalités étendues : il permet de faire varier la perméabilité, de prendre en compte la dispersion, ainsi qu'une recharge homogène. Il fonctionne à la fois en régime permanent et transitoire

Le logiciel WhAEM ; fourni par l'EPA, est basé sur la méthode des éléments analytiques (Haitjema, 1995) ; il ne prend pas en compte la dispersion, ni le régime transitoire.

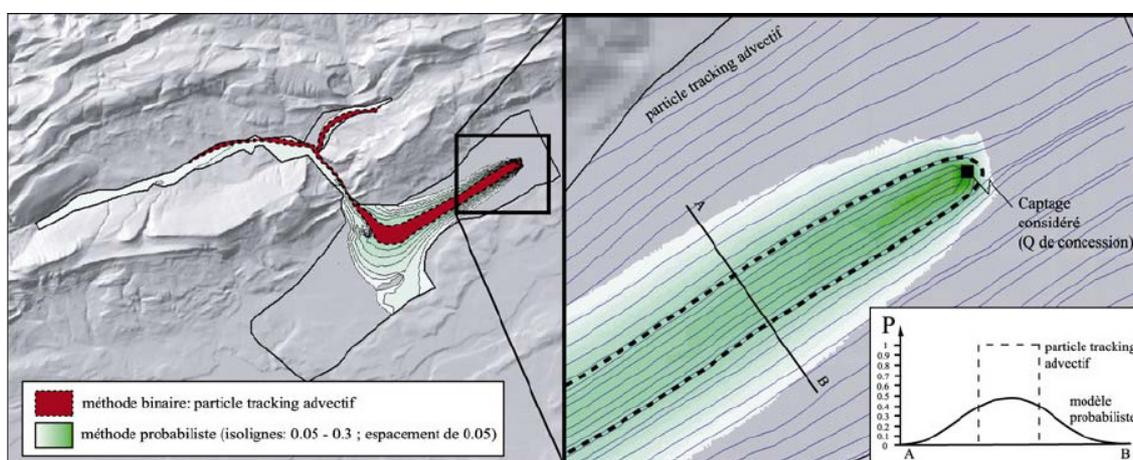


Illustration 26 – Détermination de la portion de nappe qui alimente un captage par une méthode advective et par une méthode advective/dispersive (in Bussard et al., 2004)

e) Méthodes complémentaires

Il existe un certain nombre de méthodes indirectes permettant d'apporter des éléments complémentaires pour la délimitation des BAC. Elles sont basées sur l'utilisation des **traceurs naturels et artificiels**. Ces méthodes sont particulièrement intéressantes quand **les milieux sont complexes et/ou peu connus**, ce qui est souvent le cas des **systèmes karstiques, de socle, intensément plissés et volcaniques**.

Les principales applications des essais de traçage en eau souterraine sont :

- la détermination de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine ou du temps de transfert ;
- l'évaluation des propriétés dispersives du milieu ;
- la vérification des liens hydrauliques entre différents points déterminés d'un milieu aquifère.

C'est cette dernière application qui va être utilisée pour la détermination des BAC.

Les essais de traçage peuvent être mis en oeuvre selon diverses configurations : essais en écoulement naturel, essais en écoulement convergent, essais par recirculation et essais divergents.

Les essais en écoulement naturel consistent en l'injection d'un faible volume de traceur et au suivi analytique en aval dans divers puits d'observation, sans pompage ; le faible volume injecté permet de ne pas perturber l'écoulement souterrain.

Les essais convergents consistent en l'injection d'un faible volume d'eau tracée en un point de l'aquifère et au captage du traceur dans un puits de pompage.

Les essais par recirculation consistent en l'injection à débit constant du traceur accompagnée d'une récupération par pompage, les débits d'injection et de pompage étant comparables.

Finalement, les essais divergents consistent en l'injection d'un traceur à un débit appréciable, dans le but de créer un écoulement divergent à partir du puits d'injection, et au suivi analytique en périphérie à l'aide de plusieurs piézomètres. Des combinaisons de ces types d'essais peuvent être réalisées. Par exemple, il est possible de coupler l'analyse par gradient naturel avec l'analyse en convergence vers un puits de pompage. Les essais de type convergent sont particulièrement intéressants pour préciser l'aire d'alimentation d'un ouvrage de captage.

Un guide pratique d'utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie a été publié par la Société Suisse d'Hydrogéologie (Schudel et al. 2002)

Les traceurs naturels (y compris isotopiques) sont les substances présentes dans les eaux, à un endroit donné de leur cycle, qui vont nous renseigner sur l'origine des eaux et leur parcours. Ils permettent en particulier, comme le montre l'encadré ci-dessous, de déterminer des alimentations de l'aquifère capté par d'autres aquifères. Les diagrammes de mélange permettent de caractériser le faciès chimique des eaux de l'aquifère. Ces méthodes sont mises en oeuvre dans des contextes hydrogéologiques complexes avec des relations supposées entre nappes de chimisme différents

Exemple de détermination de l'origine des eaux souterraines par analyses chimiques et isotopiques

Une étude a été effectuée pour la datation des écoulements afin d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrogéologique de la source de Font d'Armoine, dans le Quercy (Ghyselinck M., Chery L. (2004)).

Deux campagnes de prélèvements ont été effectuées sur la source de Font d'Armoine en période de basses eaux et hautes eaux afin de caractériser les faciès physico-chimiques et isotopiques de cette eau.

L'analyse des résultats chimiques et isotopiques de la source de Font d'Armoine a permis de formuler plusieurs types de scénarii quant à l'origine de son alimentation. Il semble que les eaux de la source de Font d'Armoine soient issues en très grande majorité de l'aquifère développé dans les calcaires du Kimméridgien inférieur et/ou de l'Oxfordien, par remontée à travers une zone de fracturation dont la manifestation de surface pourrait être le talweg entaillant les molasses de l'Agenais. Cependant, l'apport en nitrates et chlorures observé en décembre 2003 indique qu'une partie des écoulements provient de l'aquifère perché développé dans les éboulis du talweg. Ces infiltrations ont cependant assez peu d'influence sur la température de l'eau et sur les teneurs en tritium, y compris en période hivernale.

f) Avantages et inconvénients des différentes méthodes

Les avantages et inconvénients des différentes méthodes présentées sont résumés dans le tableau ci-dessous, tout en insistant sur le fait qu'il est préférable de combiner plusieurs méthodes plutôt que de se limiter à une seule et qu'elles ne doivent en aucun cas se substituer à l'étude géologique et hydrogéologique du site.

Méthode de délimitation de la portion de nappe alimentant le captage	Paramètres	Avantages	Inconvénients
Limites structurales	Données de sondages, affleurements	Utilise les résultats de l'étude géologique	Suppose que les limites sont imperméables ; utilisable seulement pour des sources en nappe libre, avec perméabilités et infiltration relativement homogènes sur le bassin (pas applicable aux karst par exemple)
Méthode hydrodynamique graphique	Niveaux piézométriques ; isopièzes	Méthode intégratrice ; Tient compte de l'hétérogénéité du milieu et de la géométrie du réservoir ; possibilité de prendre en compte plusieurs états piézométriques.	cartes piézométriques régionales rarement assez précises ; peu adaptée pour les milieux fracturés et karstiques ; peu adaptée en cas de forte anisotropie du milieu ; peu précise à proximité de l'ouvrage
Analytiques (Bear et Jacob, 1965)	Gradient hydraulique ; perméabilité ; épaisseur de l'aquifère ; débit de pompage	Simple à mettre en œuvre ; permet de faire des simulations probabilistes (méthode de Monte-Carlo)	Milieu homogène, isotrope et infini ; régime permanent ; applicable en toute rigueur seulement aux nappes captives ; tendance à réduire l'aire d'alimentation ;
Méthodes des éléments analytiques (WhAEM)	Conditions aux limites ; perméabilité ; débit ; recharge	Simple à mettre en œuvre ; permet de faire varier la perméabilité ; permet de prendre en compte une	Milieu isotrope ; Ne prend pas en compte la dispersion ; régime permanent

		recharge et les relations nappe/rivière	
Modèles numériques simples (ASMWIN)	Conditions aux limites ; Paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs (K, ω , σ) ; recharge ; prélèvements	Simple à mettre en œuvre ; permet de faire varier la perméabilité ; prend en compte la dispersion ; permet de prendre en compte une recharge ; régime permanent et transitoire	pas de facilité offerte pour le calage ; pas de multi-couche ; pas de relation nappe-rivière
Modèles numériques complexes (WINMARTHE, MODFLOW, ...)	Conditions aux limites ; Paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs (K, ω , α) ; recharge ; prélèvements	Méthode complète qui permet de prendre en compte hétérogénéités, anisotropie, dispersion, recharge, relations nappe-rivière. Considère les aspects transitoires (déplacement du bassin en fonction des années sèches ou humides, variation de débit de pompage, etc...) ; Considère la variabilité spatiale. Applicable à la plupart des types d'aquifères	Nécessite des données et un bon modèle conceptuel de l'aquifère ; compétences particulières en modélisation ; appliquer avec précaution pour les aquifères karstiques

2.1.3. Délimitation de l'extension en surface du bassin d'alimentation

Il s'agit de définir l'extension du bassin d'alimentation du captage, c'est-à-dire la portion de territoire qui participe à l'alimentation du captage. Pour cela, il est nécessaire d'établir un modèle conceptuel du cheminement de l'eau en surface et dans le sous-sol basé sur les processus d'alimentation et de perte (Illustration 5).

Dans les cas simples, les écoulements peuvent être uniquement verticaux dans la zone non saturée. Cependant, il est fréquent que le bassin soit plus complexe et qu'il comporte des importations et des exportations latérales.

Alimentations

- 1 - Infiltration efficace des eaux météoriques dans la couverture
- 2 - Infiltration des cours d'eau
- 3 - Infiltration artificielle des eaux claires urbaines (toits, places, chemins d'accès, fuites de réseaux d'AEP et d'eaux usées).
- 4 – Installation de réalimentation artificielle
- 5 - Apport par des écoulements latéraux de subsurface (ou écoulements hypodermiques) qui atteignent l'aquifère principal.

6 - Apport par d'autres aquifères

Pertes

7 – Evapotranspiration réelle

8 - Ruissellement

9 - Les écoulements de subsurface

10 - Les drainages : si les eaux drainées ne se réinfiltrent pas en aval, elles sont extraites du système.

11 - Les sources et autres exutoires naturels de la nappe. Selon le contexte, la nappe peut s'exfiltrer dans les cours d'eau.

12 - Les puits de pompage.

13 - Les pertes dans d'autres aquifères.

14 – L'évaporation dans les lacs de gravière

Pour contrôler la surface du BAC ainsi délimité, on peut utiliser la méthode du **bilan hydrologique** (alimentation = pertes). L'illustration 27 présente les formules les plus utilisées pour le calcul de bilan, reprises de Bussard et al. (2004).

Formule		Signification
Superficie du bassin d'alimentation du captage		
$S_{BA} = \frac{Q_c + Q_p - Q_i}{I_e} \cdot D_f$	S_{BA}	Surface du bassin d'alimentation du captage [m ²]
	Q_c	Débit de dimensionnement du captage considéré [m ³ /s]
	Q_p	Débit moyen des pertes du bassin d'alimentation comme des prélèvements supplémentaires dans le bassin d'alimentation du captage, les exfiltrations dans des eaux de surface ou dans des drainages [m ³ /s]
	Q_i	Infiltration des eaux de surface [m ³ /s]
	I_e	Recharge spécifique du bassin d'alimentation du captage par les eaux météoriques [m/s]
	D_f	Facteur de correction [-] : voir plus bas
Recharge de la nappe par les eaux de surface infiltrantes		
Formule de base : $I = P_b - R - E$	I	Recharge de la nappe par infiltration des eaux météoriques [m ³ /s]
	P_b	Précipitations régionales [m ³ /s]
	R	Ruissellement [m ³ /s]
	E	Evaporation [m ³ /s] : somme de l'évaporation, de l'interception et de la transpiration
Formule simplifiée : $I_e = P_b \cdot f$	I_e	Recharge spécifique de la nappe par infiltration des eaux météoriques [m/s]
	P_b	Précipitations [m/s]
	f	Coefficient d'infiltration [-] $f \approx 0.5$ pour les régions à forte infiltration $f \approx 0.3$ pour les régions à faible infiltration (couches de couverture constituées de sédiments fins, terrains en pente etc.)
Plusieurs régions avec des recharges différentes : $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$	I	Recharge de l'ensemble du bassin d'alimentation [m ³ /s]
	$I_1 \dots$	Recharge de chacune des différentes régions [m ³ /s]
Facteur de correction D_f		
Pour les petits bassins d'alimentation : $1 \leq D_f \leq 1.5$ Pour les grands bassins d'alimentation (plusieurs km ²) : $1 \leq D_f \leq 2.5$	D_f	La dispersion hydrodynamique et les changements continus, à petite échelle, de l'écoulement (comportement non stationnaire du champ d'écoulement) entraînent un mélange des eaux souterraines. Grâce à l'introduction d'un facteur de correction D_f [-] ce processus est pris en compte dans le calcul.

Illustration 27 – Bilan hydrogéologique (d'après Bussard et al., 2004)

2.1.4. Cas des milieux fissurés

Le guide de l'US EPA (1991) sur la délimitation des périmètres de protection de protection en milieu fissuré a testé les méthodes classiques sur deux cas d'aquifères fissurés et propose différentes approches pour la délimitation des périmètres de protection d'aquifères fissurés libres qui ne se comportent pas comme un milieu poreux. Ces approches sont classiques, basées sur la cartographie de la vulnérabilité, de la piézométrie, la géochimie et l'utilisation de modèles hydrodynamiques et de transport en milieu poreux.

L'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage en Suisse a publié en 2003 un guide sur la délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré (OFEFP, 2003).

Ce guide est basé sur le fait que **le dimensionnement des zones de protection est déterminé par la vulnérabilité du bassin d'alimentation du captage** (cf. chapitre 3). Les conditions géologiques et hydrogéologiques régnant dans les aquifères en milieu fissuré sont si diverses qu'il n'est pas possible d'appliquer une méthode unique. C'est pourquoi la démarche méthodologique systématique à mettre en œuvre prévoit une première étape consistant à recueillir et interpréter des données de base relatives au captage et à l'aquifère. Les données telles que débit, paramètres physico-chimiques, turbidité et caractéristiques biologiques permettent d'évaluer la vulnérabilité du captage.

En fonction de cela, le guide propose trois méthodes :

- Si celui-ci s'avère peu sensible aux contaminations, on est en droit de délimiter des zones de protection d'extension minimale (méthode des distances).
- Un captage vulnérable requiert des investigations complémentaires destinées à mieux appréhender les écoulements souterrains et le degré d'hétérogénéité de l'aquifère. Si celui-ci est relativement homogène, les zones de protection sont délimitées en se basant sur les isochrones d'écoulement (méthode des isochrones).
- La méthode multicritère « DISCO », plus complexe, ne s'applique qu'aux aquifères très hétérogènes exploités par des captages vulnérables (cf. chapitre sur la vulnérabilité)

2.1.5. Cas des milieux karstiques

Aucune méthode de délimitation des bassins d'alimentation en milieux karstiques n'a été spécialement formalisée. La délimitation des bassins d'alimentation doit tenir compte de la spécificité des milieux karstiques et de la dualité de leur mode d'alimentation : diffus par les précipitations et ponctuel au niveau de pertes.

Les aquifères karstiques possèdent des modalités d'infiltration particulières qui n'existent pas dans les autres aquifères. L'infiltration se fait au travers d'une zone épikarstique (zone plus perméable du fait de l'altération), drainée vers la zone noyée

de l'aquifère, soit de manière rapide au travers des conduits verticaux soit lentement, au travers de fissures.

Les écoulements en surface sont rares sur le substratum carbonaté karstifiable ; des objets morphologiques à la surface en sont les témoins : vallées sèches et dolines ou bétoires (dénomination propre à la région des aquifères de la craie). Cependant, des écoulements en surface de l'aquifère karstique s.s. peuvent prendre place au niveau de formations imperméables résultant de la décalcification (ex. argiles de décalcification). Le ruissellement prend place au niveau des formations imperméables ou non karstifiables adjacentes aux formations aquifères ; au contact des formations imperméables et des formations carbonatées, des pertes absorbent les écoulements de surface et constituent ainsi une alimentation directe par ruissellement de la zone noyée. Dans ce cas, l'aquifère karstique s.s. n'est qu'une partie du système karstique dont l'impluvium inclut la surface d'alimentation de la formation calcaire et le bassin versant topographique drainé par les pertes.

Deux types de bassins d'alimentation des sources karstiques doivent ainsi être distingués en fonction de la nature de leur impluvium : (i) les bassins d'alimentation de type endogènes, c'est-à-dire constitués uniquement par les formations carbonatées affleurantes (système karstique unaire) et (ii) les bassins d'alimentation « mixtes » - endogènes et exogènes, constitués de terrains carbonatés karstifiés et de terrains non karstifiables, sur lesquels les eaux peuvent ruisseler et s'infiltrer en un point ou une zone donnée (proche du contact entre les terrains karstiques et non karstifiables) (système karstique binaire). Dans le premier cas, l'impluvium correspondant à la surface du bassin d'alimentation de la source est constitué uniquement de terrains karstifiables. Dans le second cas, une partie de l'impluvium est constituée de terrain non karstifiables qui concentrent l'infiltration de eaux en un point au niveau d'une perte, l'autre partie est constituée de terrains karstifiables (Illustration 9)

a) Formulation d'une méthode de délimitation des bassins d'alimentation en milieu karstique

La délimitation des bassins d'alimentation des captages de sources en milieu karstique doit ainsi 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 (Schudel et al., 2002) pour prouver l'existence de connexions hydrauliques pour différentes conditions hydrologiques (à noter l'existence possible de diffuence 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 ;
- (iii) à partir du calcul d'un bilan hydrologique, permettant d'obtenir la surface du bassin d'alimentation. Il ne s'agit donc pas de la délimitation proprement dite mais d'une vérification de la surface du bassin délimité par les méthodes précédentes ;

b) Calcul du bilan hydrologique

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 ; elle permet de caractériser globalement les limites de l'impluvium du système. La méthode consiste à évaluer pour une période donnée, le volume d'eau écoulé à l'exutoire (V) 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). La partie des précipitations qui ruisselle ne contribue pas à l'écoulement de l'exutoire du système, telle est l'hypothèse faite pour les systèmes karstiques. 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 s'affranchir des paramètres climatiques.

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

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}, \quad \text{avec } L = 300 + 25 T + 0.05 T^3 \quad (3)$$

où P représente les précipitations (mm) et T la température (°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.

Cette formule est d'un emploi aisé mais elle ne donne malheureusement que l'ordre de grandeur de l'ETR. Elle ne se rapproche de l'évapotranspiration réelle que pour des bassins versant relativement étendus, sans échanges à la frontière et pour des durées d'observation assez longues pour que l'on puisse négliger les variations de réserves souterraines.

Il existe d'autres méthodes de calcul de l'ETR, telles que le bilan simplifié selon Thornwaite et le bilan tenant compte du stress hydrique de la végétation. Ces méthodes sont détaillées dans divers ouvrages d'hydrologie, par exemple celui de J.P. Laborde (2000).

c) Analyse des débits classés

La méthode d'analyse des débits classés a pour objectif de caractériser les différents régimes d'écoulement observables sur un exutoire. Il s'agit d'identifier des événements particuliers de type mise en fonctionnement d'un trop plein, fuites vers un autre système à partir d'une analyse des modifications qu'ils induisent sur les hydrogrammes (Marsaud, 1997).

La méthode proposée par Mangin (1971) consiste à classer les débits par groupes afin de mettre en évidence des valeurs de débits critiques : valeurs anormalement élevées ou faibles. Une loi statistique est ajustée liant les classes de débit à leurs fréquences d'apparition.

L'interprétation des graphes de débits classés repose sur l'identification d'anomalies affectant la droite représentative ; ces anomalies se marquent par des modifications de la pente de la droite (Illustration 29).

Cette méthode permet de :

- mettre en évidence la présence d'un impluvium fluctuant au travers des fuites ou d'apports éventuels pouvant se produire entre différents systèmes karstiques ;
- déterminer les conditions de mise en fonctionnement de trop-pleins ;
- vérifier la qualité de la station de jaugeage de l'exutoire.

Ceci permet d'obtenir des éléments sur les processus d'alimentation et de pertes

Cas	Pentes des droites	Position de la rupture	Interprétation
A	$\alpha_2 > \alpha_1$	Forts pourcentages	- Mise en fonctionnement de trop-plein - Fuites vers un autre système - Stockage momentané - Fuites ou débordement de la station de jaugeage lors des hautes eaux
B	$\alpha_2 < \alpha_1$		- Apports en provenance d'un autre système - La station de jaugeage prend en compte lors des crues des écoulements n'appartenant pas au système
C	$\alpha_2 < \alpha_1$	Faibles pourcentages	- Apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
D	$\alpha_2 > \alpha_1$		- Constitution d'une réserve
E	$\alpha_3 > \alpha_2$ $\alpha_3 < \alpha_2$	Double rupture	- Piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement

Illustration 28 : interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés.

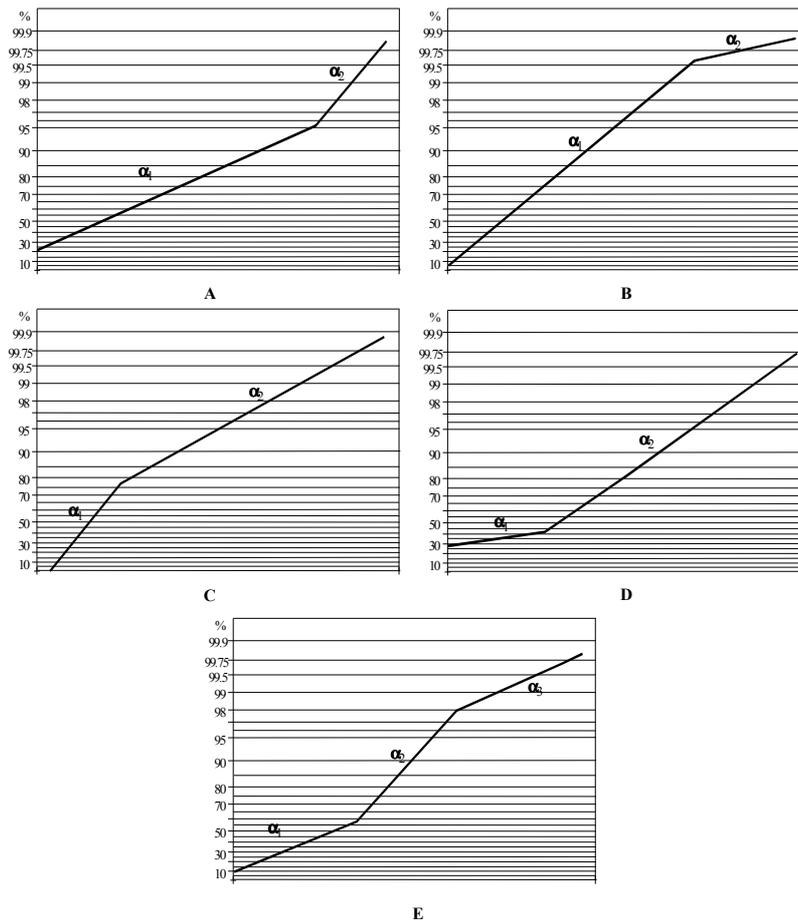


Illustration 29 : Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés (Marsaud, 1997).

2.1.6. Facteurs influençant la délimitation des BAC

Un certain nombre de facteurs entraînent des écarts souvent importants entre le bassin d'alimentation réel et le bassin estimé. Ces facteurs sont essentiellement liés à la structure des aquifères et à la méthode employée.

Parmi les facteurs liés à la structure des aquifères, on peut citer :

- Un aquifère constitué d'un milieu poreux, anisotrope, hétérogène et à géométrie interne complexe;
- Un aquifère dont les limites sont irrégulières, tant latéralement qu'à son sommet et à sa base ;
- Un aquifère constitué d'une formation fracturée ou karstique ;
- Un aquifère en relation avec les eaux de surface.

Ce dernier point est particulièrement important

Par ailleurs, la méthode choisie doit être adaptée au type d'aquifère mais doit surtout être appliquée à partir de données fiables et en prenant en compte l'incertitude des données et leur variabilité temporelle

2.2. DELIMITATION DES ZONES DE CONTRIBUTION A L'ALIMENTATION DU CAPTAGE

Le bassin d'alimentation d'un captage peut couvrir des superficies importantes, plusieurs dizaines, voire centaines de km². Vouloir protéger l'ensemble du bassin peut s'avérer extrêmement coûteux voire matériellement irréalisable selon le type d'occupation du sol.

Une solution consiste à protéger prioritairement les zones qui contribuent le plus à l'alimentation du captage. Il en résulte une protection ciblée permettant d'optimiser le rapport efficacité / coût des mesures. Pour cela, il est impératif d'étudier et de quantifier le cheminement de l'eau depuis la surface du bassin d'alimentation jusqu'au captage considéré. En d'autres termes, il est nécessaire, dans la mesure du possible, de déterminer, pour tout lieu à la surface du sol, quelle est sa participation à l'alimentation en eau du captage.

Une autre solution consiste à protéger les zones les plus vulnérables vis-à-vis des pollutions diffuses du bassin d'alimentation. Elle permettrait également une protection ciblée. Ces deux solutions ne sont d'ailleurs pas exclusives dans la mesure où les critères retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité et ceux retenus pour l'évaluation des zones les plus contributives peuvent être de même nature. Néanmoins ces deux approches étant traitées de manière indépendante dans la littérature, nous les présenterons dans des chapitres distincts. Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sont très nombreuses et différentes selon les types d'aquifères ; elles seront présentées dans le chapitre 3. Pour l'évaluation des zones contributives à

l'alimentation du captage, une méthode a été spécifiquement développée par les Suisses pour le dimensionnement des zones de protection contre les pollutions diffuses dites aires d'alimentation Zu. Cette méthode mise au point par Bussard (2005) est présentée de manière détaillée en annexe 1. Nous nous limiterons ici à présenter la démarche.

Une fois délimité le bassin d'alimentation du captage (cf. 2.1.), la méthode consiste à calculer la contribution à l'alimentation du captage à partir d'une quantification des processus d'alimentation et d'exportation. La plus ou moindre grande hétérogénéité spatiale de la contribution est fonction :

- d'hétérogénéités de l'infiltration efficace des eaux météoriques dans la couverture,
- d'une forte infiltration de cours d'eau,
- d'exportations dans la zone non saturée. L'eau infiltrée peut par exemple être exportée localement par des drainages agricoles ou une nappe perchée,
- du cheminement de l'eau dans la zone saturée. Cette notion dépend des propriétés intrinsèques des terrains géologiques et de leur hétérogénéité, ainsi que du champ de potentiel hydraulique; suivant le contexte, l'eau peut atteindre d'autres captages ou d'autres exutoires, ou suivre, en partie, l'écoulement régional de l'aquifère.

• **Quantification des processus d'alimentation et d'exportation**

Il s'agit de quantifier l'alimentation de la nappe. Pour cela, il est nécessaire de :

1) Quantifier la répartition spatiale de l'infiltration efficace des eaux météoriques dans la couverture (I_e) et l'infiltration des rivières (I_r). Le regroupement de ces deux types d'infiltration est désigné par I [m/s]. L'une des deux valeurs étant toujours nulle en tout point du bassin d'alimentation, le champ I vaut la somme des champs I_e et I_r . Selon l'hétérogénéité des sols, les relations cours d'eau/aquifère et la taille du bassin d'alimentation, I sera considérée comme homogène ou hétérogène.

2) Quantifier la répartition des exportations (e) [-] des eaux infiltrées avant qu'elles atteignent la nappe principale ($0 \leq e \leq 1$). Des drains agricoles ou des écoulements de nappes perchées peuvent diminuer le flux hydraulique provenant de la surface.

• **Contribution au débit**

Le flux d'eau qui atteint la nappe depuis tout point i de la surface du bassin d'alimentation est donné par le produit $I_i(1-e_i)$ (Illustration 30). Il permet de calculer sa contribution C_i au débit capté en multipliant ce produit par la probabilité P_i qu'une particule d'eau ayant atteint la nappe depuis le point i en surface rejoigne le captage

$$C_i = I_i (1 - e_i) P_i$$

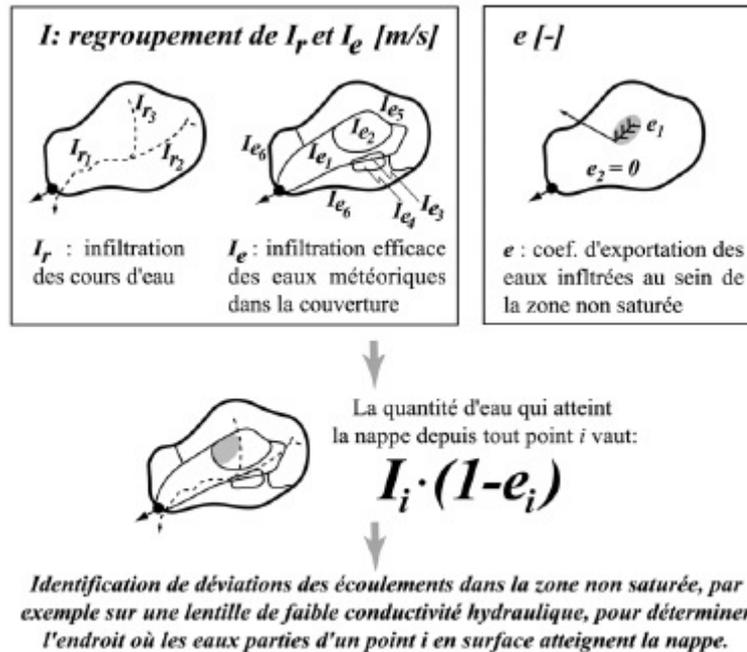


Illustration 30 - Quantification du flux d'eau qui atteint la nappe principale (in Bussard, 2005)

Les facteurs conditionnant la quantité d'eau qui s'infiltré sont :

- le **climat** : peut être caractérisé par l'altitude (z) du lieu considéré, les précipitations brutes annuelles moyennes (P_b) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). En règle générale, nous pouvons admettre que le climat est homogène pour l'ensemble du bassin d'alimentation.
- la **topographie** : Ce paramètre conditionne fortement la quantité d'eaux météoriques qui ne s'infiltré pas et qui part par ruissellement. Il convient donc de subdiviser le bassin d'alimentation en zones de différentes pentes et d'identifier les dépressions topographiques qui récoltent les eaux de ruissellement.
- **l'occupation du sol**,
- les **caractéristiques du sol et du sous-sol** : L'épaisseur du sol, sa nature et celle du sous-sol conditionnent en partie la quantité d'eau qui va percoler en dessous de la zone d'enracinement, en direction de la nappe.

Ces facteurs sont souvent également pris en compte dans les méthodes de cartographie à index de la vulnérabilité telles que DRASTIC, EPIK ou RISK. Dans ces méthodes, la capacité d'infiltration est un critère important de la vulnérabilité. La

méthode IDPR est quant à elle basée sur une estimation du ratio Infiltration / ruissellement.⁷

Pour chaque zone d'infiltration efficace homogène, l'infiltration est calculée par la formule suivante :

$$I_{ei} = P_{bi} - R_i - ETR_i \quad [m/s]$$

P_{bi} : 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].

L'estimation du ruissellement et l'évapotranspiration nécessite des données qui sont rarement disponibles et si l'on veut les obtenir implique des mesures coûteuses. Ils peuvent également être déterminés de manière indirecte. Un coefficient de ruissellement peut être estimé en fonction de la nature du sol, de la pente et de l'utilisation du sol (Illustration 31). L'ETR peut être calculée en utilisant des modèles agronomiques prenant en compte la circulation de l'eau en milieu non saturé et les phénomènes influençant les prélèvements d'eau par les plantes. Un exemple détaillé est présenté dans la thèse de Bussard (2005) qui a utilisé le modèle COUP (Jansson et Kalberg, 2001). Des outils de modélisation du processus d'infiltration sont également présentés en annexe 3. Le calcul d'infiltration efficace peut être affiné par des essais ponctuels d'infiltration d'eau et des mesures géoélectriques.

Type de sol	Pente [%]	Coefficient de ruissellement C_r		
		Forêts	Prés et champs	Terrains nus
Fort taux d'infiltration Sols légers et léger-macro	1	0.01	0.02	0.13
	4	0.04	0.07	0.23
	10	0.07	0.13	0.34
	30	0.13	0.25	0.55
	50	0.17	0.33	0.69
Taux d'infiltration moyen Sols moyens	1	0.04	0.07	0.16
	4	0.12	0.16	0.28
	10	0.21	0.28	0.41
	30	0.39	0.48	0.66
	50	0.51	0.62	0.83
Faible taux d'infiltration Sols lourds	1	0.09	0.15	0.18
	4	0.19	0.25	0.32
	10	0.31	0.37	0.48
	30	0.51	0.60	0.70
	50	0.65	0.76	0.90

Illustration 31 - Coefficient de ruissellement en fonction de la nature du sol, de la pente et de l'utilisation du sol. (in Bussard, 2005)

⁷ Ces méthodes sont développées dans la chapitre 3

Les processus **d'exportation** traduisent les phénomènes d'évacuation de l'eau hors du système ayant lieu entre la surface du sol et celle de la nappe. On peut en citer deux principaux : l'exportation par des drains et l'exportation par la présence de lentilles de faible conductivité hydraulique.

Le coefficient d'exportation par les drains est estimé à partir du débit de drainage ramené à la superficie concernée par le drainage. Le débit des collecteurs de drains sera mesuré par les techniques classiques de jaugeage.

La présence d'un niveau de faible conductivité hydraulique situé à proximité de la surface peut conduire à une exportation partielle (voire complète) des eaux infiltrées avant qu'elles atteignent la nappe. Ce niveau est généralement mis en évidence par la présence de sources s'il est situé à proximité de la surface. En revanche, s'il se situe plus en profondeur, seuls des forages peuvent identifier sa présence. Sa géométrie pourra être déterminée par interpolation entre des forages rapprochés ou par les moyens indirects de la géophysique.

Le paramètre P est la **probabilité** qu'une particule d'eau arrivée dans la nappe depuis un point i en surface aille au captage. Si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de dispersion, P sera égale à 1 à l'intérieur du BAC et à 0 à l'extérieur. Si on prend en compte la dispersion, P varie entre 0 et 1 (Illustration 26).

Par contre d'autres paramètres doivent être pris en compte dans le calcul de P ; il s'agit des interférences liées à un autre pompage présent à l'intérieur du bassin d'alimentation du captage principal et de l'alimentation par la nappe de cours d'eau (Illustration 32).

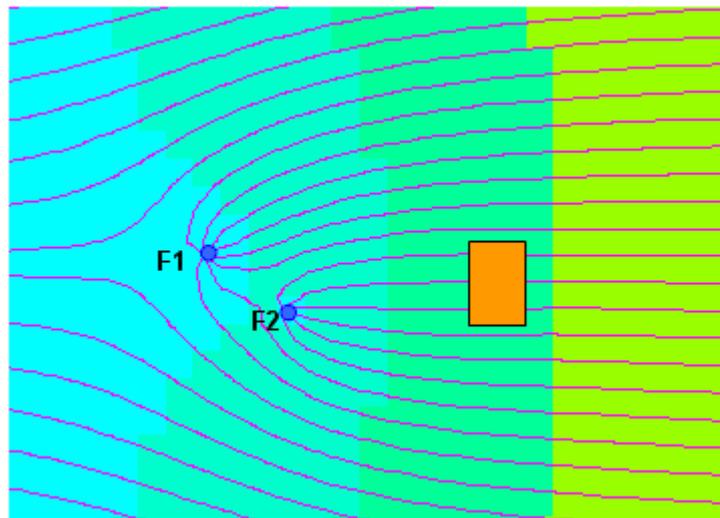


Illustration 32 – Interférences liées à la présence d'un autre pompage

l'illustration 33 résume les différentes étapes de délimitation des zones les plus contributives à l'alimentation du captage. Dans l'exemple, le bassin d'alimentation a été

divisé en cellules d'infiltration efficace homogène, en se basant sur la distribution spatiale de la nature et de l'épaisseur du sol, de la nature et de la conductivité hydraulique du sous-sol.

Trois unités ont finalement été distinguées, correspondant à trois types de sols. L'infiltration efficace dans ces unités a été calculée à l'aide du modèle COUP (Jansson et Kalberg, 2001) pour une prairie sur parcelle plate. Les mesures de conductivité hydraulique du sous-sol ont été intégrées dans les simulations. Le rôle de la couverture sur la quantité d'eau qui s'infiltré annuellement en direction de la nappe a ainsi pu être mis en évidence.

Le champ d'exportation a été calculé à partir des drainages agricoles et d'exurgences des eaux infiltrées sous forme de sources.

La probabilité qu'une particule d'eau arrivée dans la nappe aille au captage est égale à 1 à l'intérieur du BAC et à 0 à l'extérieur.

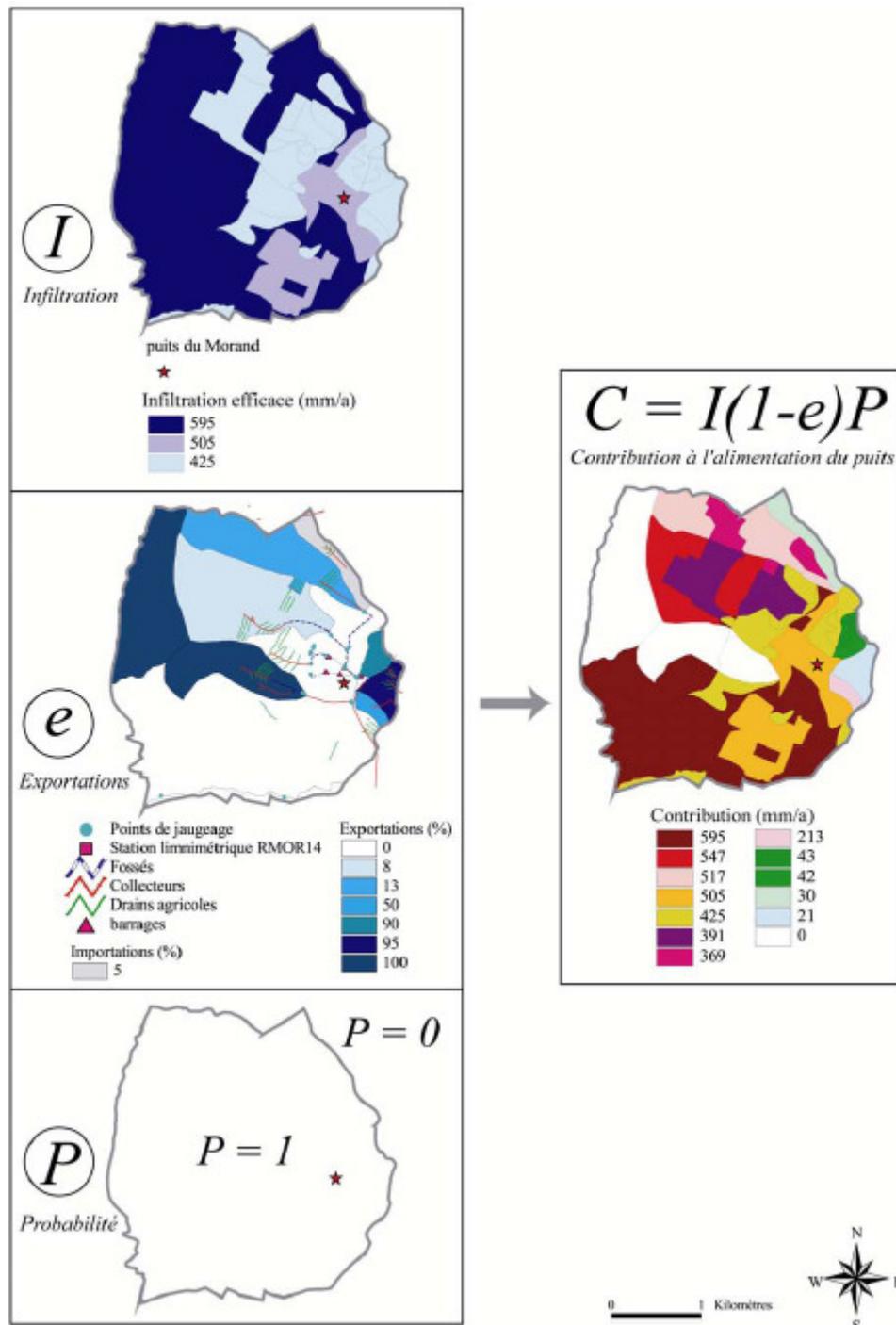


Illustration 33 - Exemple de détermination du champ de contribution à l'alimentation d'un captage (in Bussard, 2005)

3. Vulnérabilité des eaux souterraines et cartographie multicritère

3.1. CONCEPT DE VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

3.1.1. Définitions

Dans le domaine de la qualité des eaux souterraines, la vulnérabilité d'un aquifère peut être définie, dans un sens large, comme sa plus ou moins grande capacité de défense face à un processus de contamination.

Plus généralement, le concept de vulnérabilité utilisé dans le cadre de la protection des eaux souterraines repose sur la manière de décrire la sensibilité des eaux souterraines à toute forme de stress. On peut donc parler de vulnérabilité des eaux souterraines à la sécheresse ou aux inondations par remontée de nappe, mais aussi aux contaminations.

Margat (1968) a introduit l'expression de "vulnérabilité des eaux souterraines à des contaminations". La notion même de vulnérabilité est basée sur l'hypothèse que l'environnement physique peut constituer une protection de l'eau souterraine vis-à-vis d'un contaminant qui pénètre en surface. Le matériel rocheux de l'aquifère peut agir comme un filtre naturel pour éliminer certains contaminants.

La définition d'Albinet et Margat (1970) a été l'une des premières reconnue et généralement utilisée: *la vulnérabilité d'un aquifère est la possibilité qu'a un contaminant de percoler et de diffuser depuis la surface jusqu'au réservoir d'eau dans des conditions naturelles.*

En 1974, Olmer et Rezac suggèrent que la vulnérabilité des eaux souterraines est *le degré de dangerosité déterminé par les conditions naturelles et non pas par les sources actuelles de pollution.*

Dans ces deux définitions, la vulnérabilité est considérée comme fonction de la perméabilité de la zone non saturée et de la zone saturée (déterminant en partie les vitesses d'écoulement).

Une dizaine d'années plus tard, Villumsen et al. (1983) proposent que la vulnérabilité des eaux souterraines *soit définie comme le risque qu'une substance chimique, utilisée ou entreposée sur le sol, puisse représenter pour la qualité des eaux souterraines.* Selon ces auteurs, la vulnérabilité des eaux souterraines dépend d'une série de paramètres dynamiques et statiques; ils insistent sur le fait que la composition chimique d'une eau souterraine peut être utilisée comme indicateur de la vulnérabilité et proposent que les analyses chimiques des eaux soient utilisées pour vérifier les cartes de vulnérabilité.

Dans les années 1980, de nombreuses définitions sont proposées à la fois pour le terme vulnérabilité et pour les paramètres sur lesquels cette notion devrait reposer. Margat et Suais-Parascandola (1987) proposent que les cartes soient basées sur des facteurs hydrogéologiques fondamentaux, tels que profondeur de la nappe, perméabilité des dépôts sus-jacents, connexion entre les eaux de surface et souterraines, vitesse moyenne des écoulements souterrains. L'interprétation des conditions hydrogéologiques en terme de vulnérabilité est qualitative, elle ne prend pas en compte les processus de migration des contaminants de la surface à la nappe. En Allemagne, Vierhuff et al. (1987) basent la vulnérabilité d'un aquifère sur deux aspects principaux: le degré de protection par les couches supérieures contre les contaminations venant de la surface et le potentiel de purification des eaux contaminées d'un aquifère. Trois critères sont utilisés : (i) type d'aquifère, (ii) situation de l'aquifère dans le cycle hydrologique et (iii) caractéristiques de la zone non saturée ou des niveaux confinés.

D'autres auteurs séparent la notion de vulnérabilité d'un aquifère à la pollution de celle de risque ; certains parlent aussi de sensibilité. Ainsi, Foster (1987) définit la vulnérabilité d'un aquifère à la pollution comme les *caractéristiques intrinsèques qui déterminent la sensibilité de différentes parties d'un aquifère pouvant être soumises à une contamination*. Il distingue cette notion de celle de risque de pollution d'une eau souterraine : *l'interaction entre la vulnérabilité naturelle d'un aquifère et la charge polluante appliquée, ou susceptible de l'être, en surface résultant de l'activité humaine*.

Plus récemment, Palmquist (1991) introduit la notion de la nature du contaminant éventuel. Il définit la vulnérabilité d'une eau souterraine comme *la mesure du risque qui pèse sur les eaux souterraines à cause de l'activité humaine et la présence de contaminants* et il déclare que *sans la présence de contaminants, même les eaux souterraines les plus susceptibles ne sont pas à risque, et donc ne sont pas vulnérables*. Dans cette approche, il inclut à la fois la susceptibilité de l'eau souterraine à une contamination et le type et la quantité de contaminant potentiel comme des éléments essentiels de l'estimation de la vulnérabilité. En 1992, Foster et Adams définissent la vulnérabilité d'un aquifère à une contamination comme étant fonction de *l'inaccessibilité du polluant à la zone saturée (au sens hydraulique) et de la capacité d'atténuation des couches au-dessus de la zone saturée résultant de la rétention ou des réactions physico-chimiques des contaminants*.

La distinction entre vulnérabilité intrinsèque et spécifique a été introduite en 1993 par l'US Committee Techniques for Assessing Groundwater Vulnerability qui les définit de la façon suivante : (i) Vulnérabilité *intrinsèque* : elle se réfère à la vulnérabilité déterminée sans considération des attributs et du comportement de polluants particuliers (ii) Vulnérabilité *spécifique* : elle est utilisée lorsque la vulnérabilité se réfère à un polluant particulier, une classe de contaminant ou à une activité humaine particulière.

Nous retiendrons ainsi à la suite de cette revue bibliographique, les définitions de l'Action COST 620, reconnues et utilisées par tous :

- La **vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la

sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités humaines, ou encore pour représenter les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques, climatologiques et de végétation naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités humaines.

- La **vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un contaminant particulier ou à un groupe de contaminants. Elle prend en compte les propriétés des contaminants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

La vulnérabilité ou sensibilité des eaux souterraines aux contaminations est une propriété relative, non mesurable ou quantifiable et sans dimension (Vrba & Zaporozec, 1994). On distingue ainsi la vulnérabilité intrinsèque (ou naturelle) de la vulnérabilité spécifique.

Ces définitions de vulnérabilité intrinsèque et spécifique généralement reconnues et acceptées n'impliquent cependant pas une approche standardisée de la cartographie de la vulnérabilité. Les environnements hydrogéologiques sont beaucoup trop divers pour que l'on puisse appliquer une méthode de détermination unique. Il est toutefois indispensable d'avoir une définition commune et acceptée par tous avant de pouvoir proposer des méthodes pour cartographier la vulnérabilité dans des milieux aussi divers et à des échelles différentes (du bassin d'alimentation à un pays ou une région comportant des aquifères de différents types (poreux, fissurés, karstiques).

3.1.2. Vulnérabilité de la ressource et origine de la vulnérabilité des eaux souterraines

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur un modèle « origine-écoulements-cible » pour la gestion de l'environnement ; il est décrit comme suit (COST 620 et Goldscheider, 2002) (*Illustration 34*).

- L'**origine** ou la **source** de contamination correspond au lieu d'infiltration du contaminant. Dans le cadre de la cartographie de la vulnérabilité, on fait l'hypothèse que la contamination prend place au niveau de la surface du sol. Les pertes ou fuites de réseaux d'eaux usées ne sont pas considérées dans ce concept.
- Le terme **écoulements** correspond au trajet du contaminant de son point d'origine à travers le système (zone non saturée et/ ou zone saturée jusqu'au point d'eau) jusqu'à la cible à protéger. Dans le cadre de la protection de la ressource en eaux souterraines, les écoulements sont dominés par une composante verticale au sein de la zone non saturée. Des écoulements à composante horizontale peuvent exister cependant au sein de l'épikarst, dans les aquifères karstiques, où l'épikarst peut être considéré comme un aquifère perché. Dans le cadre de la protection de source (captage de sources, puits ou forages), les écoulements concernés sont ceux qui se développent essentiellement au sein de la zone saturée de l'aquifère.
- La **cible** est quant à elle l'eau souterraine qui fait l'objet d'une protection : pour la protection de la ressource, il s'agit de la surface des eaux souterraines

(interface entre la zone non saturée et la zone saturée) et pour la protection d'une source d'approvisionnement, il s'agit du captage d'eau (forage, exutoire) (COST 620).

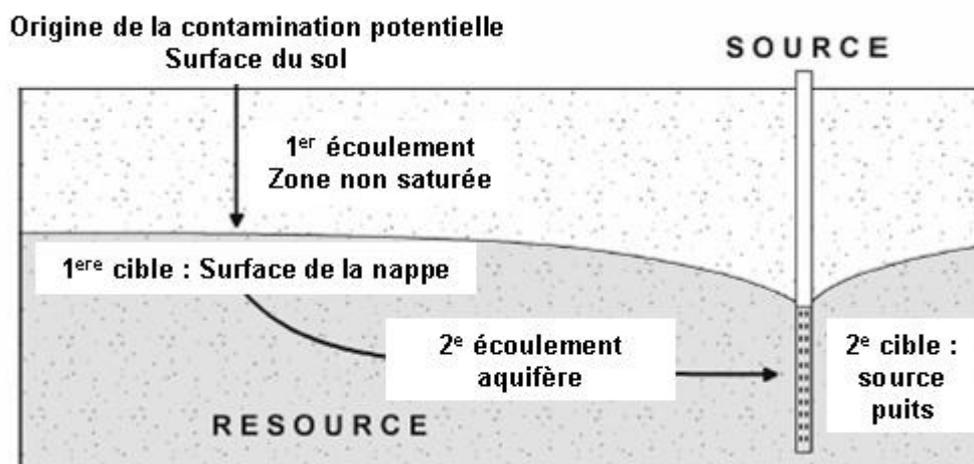


Illustration 34 – Approche européenne de la cartographie de la vulnérabilité basée sur le modèle conceptuel "origine-écoulements-cible" (COST Action 620, 2004).

3.1.3. Vulnérabilité et directive européenne sur l'eau

La section 2.1 du rapport de l'action COST 620 fait référence à une caractérisation initiale de toutes les masses d'eau souterraine, évaluant leurs usages et leur degré d'exposition à un risque vis-à-vis de la préservation de leur état initial. La caractérisation initiale est effectuée à partir des données hydrogéologiques, géologiques, pédologiques, d'aménagement du territoire, d'exploitation et de débits concernant essentiellement la masse d'eau souterraine concernée. Les formations de couverture de la zone de recharge de l'aquifère sont considérées dans le cadre de cette caractérisation. Les masses d'eau présentant un risque doivent être caractérisées plus précisément en considérant notamment les informations suivantes :

- Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques (conductivité hydraulique ou transmissivité, coefficient d'emménagement, stratification, niveaux imperméables ou semi-imperméables) ;
- Caractéristiques des formations superficielles de couverture (sol, dépôts de surface): épaisseur, coefficient d'emménagement, conductivité hydraulique et propriétés d'adsorption ;
- Inventaire des systèmes de surface associés avec lequel la masse d'eau souterraine est en relation dynamique ;
- Les directions et les vitesses d'échange de l'eau entre les eaux de surface et les eaux souterraines ;

- Calcul de la recharge annuelle de la masse d'eau souterraine.

Cette synthèse des informations retenues, bien qu'établie pour caractériser les masses d'eau souterraine, peut aussi être à l'usage de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu karstique. L'évaluation de la vulnérabilité et l'approche de cartographie présentée dans le cadre de l'Action COST 620 sont ainsi directement liés au type d'informations requises dans le cadre de la démarche de la Directive européenne sur l'eau pour les masses d'eau souterraine.

3.1.4. Spécificité de la vulnérabilité des aquifères karstiques et fissurés

Le concept de la vulnérabilité des eaux souterraines est applicable à tous les types d'aquifères, poreux, fissurés et karstiques. Cependant, à cause de la spécificité des aquifères karstiques et fissurés, le concept de caractérisation de la vulnérabilité de ces aquifères doit être adapté. L'adaptation doit prendre en considération la nature et le fonctionnement des aquifères karstiques, respectivement des aquifères fissurés. Des méthodes de caractérisation de la vulnérabilité par cartographie ont été développés, soit spécifiquement pour les aquifères karstiques de protection, avec les méthodes telles qu'EPIK, RISK(E) (Dörfliger & Zwahlen, 1998; Pételet Giraud et al., 2001) soit spécialement pour les aquifères fissurés (méthode DISCO, Pochon & Zwahlen, 2003), dans un but de disposer d'éléments pour l'établissement des périmètres de protection des captages. Des méthodes générales de caractérisation de la vulnérabilité avec possibilités d'application pour les aquifères karstiques ont été développés par Goldscheider et al. (2000) avec la méthode PI ainsi que dans le cadre de l'action COST 620 : méthode OCPK avec O pour la couche protectrice (overlying layers), C pour la concentration du flux, P pour les précipitations comme facteur externe et K pour le réseau karstique (Action COST 620, 2004).

a) Définition d'un aquifère karstique

Un aquifère karstique comprend globalement deux zones se succédant sur une verticale (Illustration 35 et Illustration 36):

- la **zone d'infiltration** : elle représente la 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.

Les aquifères karstiques sont ainsi caractérisés par une structure très hétérogène avec des perméabilités très importantes dans les conduits karstiques entourés de blocs à

très faible perméabilité. L'alimentation de ces aquifères est double, soit diffuse, soit de manière concentrée au niveau des pertes de cours d'eau (Pételet-Giraud et al., 2000).

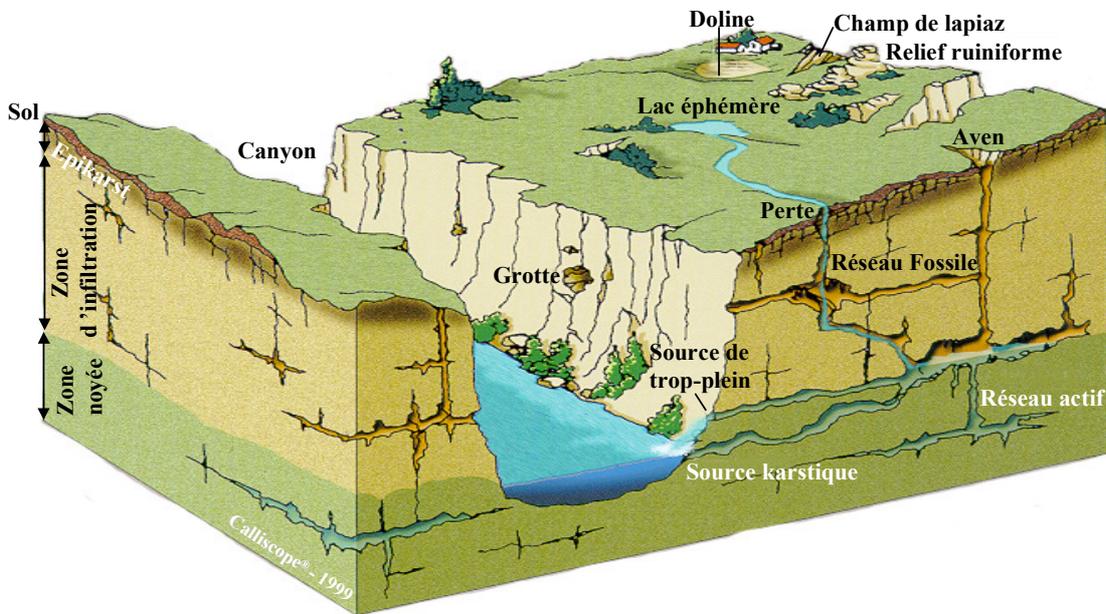


Illustration 35 – Schéma d'un aquifère karstique

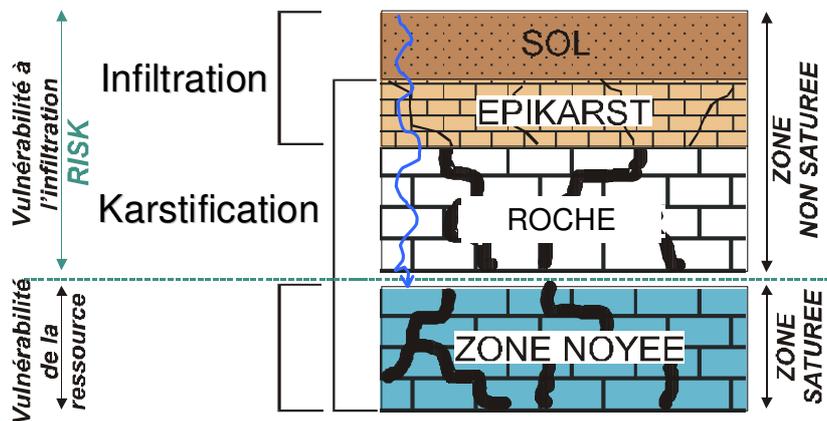


Illustration 36 – Conceptualisation de la vulnérabilité d'un aquifère karstique (Pételet-Giraud et al., 2000)

b) Définition d'un 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} m/s 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) (Fournier M., 2006). 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 aquifères karstiques de Normandie par exemple sont généralement ainsi de type « binaire », c'est-à-dire alimentés par les précipitations ainsi que par des écoulements de surface issus du ruissellement au niveau des bassins versants de pertes (infiltration des eaux au niveau des bétoires).

Les formations superficielles sont à prendre en considération pour les aquifères de type craie sous couvertures, tant elles peuvent jouer dans la protection ou la vulnérabilité des aquifères. Elles ont joué un rôle prépondérant dans le développement de la karstification sous jacente (Rodet, 1993). Ces formations sont soit des dépôts sableux, soit des argiles de décalcification 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. Trois types de formations superficielles sus-jacentes à la craie aquifère sont envisagés (Fournier, 2006) :

- 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 fracture ;
- 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. L'existence d'un aquifère perché dans les formations de couverture et/ou dans l'épikarst est un phénomène important à prendre en considération pour ce type d'aquifère.

c) Définition d'un aquifère de type milieu 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 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 (Illustration 37) : (i) une cuirasse ferrugineuse ou bauxitique d'épaisseur métrique, souvent absente, (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 (Cho et al., 2003, Lachassagne et al., 2001) ; 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 (Maréchal et al., 2005). D'une perméabilité proche de 10^{-4} m/s, leur extension latérale est comprise entre 5 et 40 m environ. Des joints subverticaux, 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'emmagasinement (Lachassagne & Wyns, 2005).

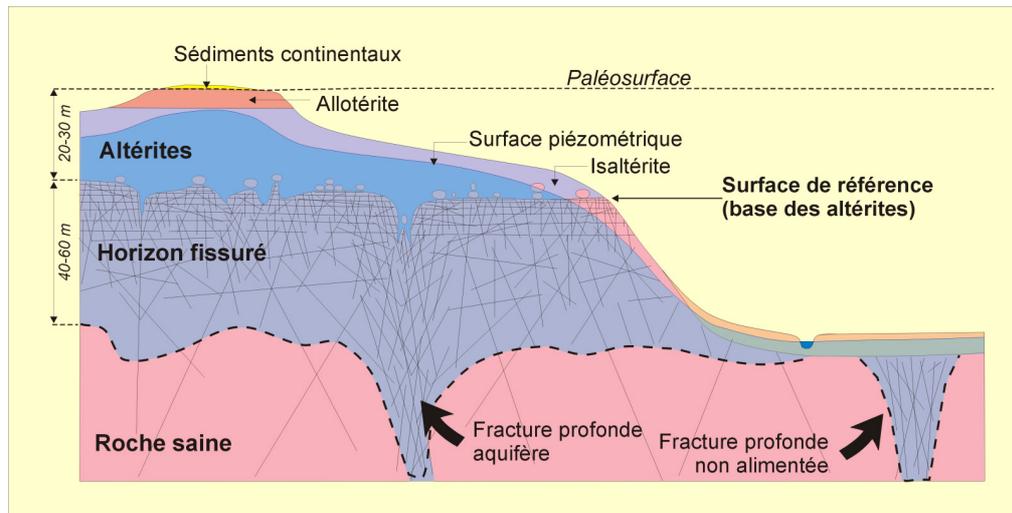


Illustration 37 – schéma conceptuel d'un aquifère fissuré en contexte de socle (granites par ex.) (Lachassagne & Wyns, 2005)

3.2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DES METHODES DE DETERMINATION DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

3.2.1. Méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines

La vulnérabilité des eaux souterraines est déterminée à partir de différentes méthodes de cartographie. Un grand nombre de méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées un peu partout dans le monde suivant des approches très diverses. Ces méthodes vont des plus sophistiquées comme les modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques ou encore biologiques qui ont lieu dans la zone non saturée et les eaux souterraines, à des modèles de pondération des différents critères qui affectent la vulnérabilité au moyen de méthodes statistiques ou de systèmes experts (Gogu et Dassargues, 1998).

Le détail des différentes méthodes figure en annexe 4.

Ces méthodes peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Les **méthodes de cartographie à index** : elles sont basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres (sols, géologie, profondeur de la nappe, ...) d'une région en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. Au début du développement de ces méthodes, tous les paramètres avaient le même poids, leur importance relative vis-à-vis de la vulnérabilité n'était donc pas prise en compte. Ces méthodes se veulent plus quantitatives.
- Les **modèles de simulation** : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques qui représentent les processus couplés qui régissent les transports de contaminants. Cette catégorie comprend les

méthodes basées sur les modèles simples de transport ainsi que les solutions analytiques ou numériques pour des modèles en une dimension de transport de contaminants à travers la zone non saturée, ou encore des modèles couplés saturé-insaturé, multiphase, à deux ou trois dimensions.

- Les **méthodes statistiques** : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractérisations sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude.

Les deux dernières méthodes (modèles de simulation et méthodes statistiques) conduisent à des cartes de pollution et sont plutôt utilisées dans le cadre de la vulnérabilité spécifique.

Les méthodes de cartographie à index sont le plus couramment utilisées ; ce sont ces méthodes qui seront présentées dans les paragraphes suivants.

3.2.2. Caractérisation de la vulnérabilité à l'aide des méthodes de cartographie à index

Au sein des méthodes de cartographie à index, trois types d'approche peuvent être distingués (Vrba et Zaporozec, 1994; Gogu et Dassargues, 1998) :

- Les méthodes utilisant une approche de **systèmes hiérarchisés**, nommées HCS d'après leur dénomination en anglais (Hydrological Complex and Settings Methods), sont basées sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones (autres bassins ou autre systèmes aquifères). Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrologiques variés à moyenne ou grande échelle (échelle régionale à nationale). Elle donne des résultats relativement qualitatifs.
- Les méthodes utilisant une approche de **systèmes paramétrés**, parmi lesquelles trois principaux groupes de méthodes peuvent être distingués d'après Vrba & Zaporozec, 1994 :
 - les méthodes basées sur les *Systèmes matriciels* (Matrix System)
 - les méthodes à *Systèmes indexés* (Rating System)
 - les méthodes de pondération et d'indexation des paramètres ou critères (*Point Count Système Models*)
- Les méthodes à **index et relations analogiques**: ces méthodes sont basées sur la description mathématique des processus hydrologiques et hydrogéologiques (équations des écoulements, du transport, de continuité, par ex.) et utilisées de manière analogique pour estimer la vulnérabilité des eaux souterraines. La plupart de ces méthodes sont utilisées pour l'évaluation de la

vulnérabilité spécifique des eaux souterraines vis-à-vis des pesticides à une échelle spatiale moyenne à grande. Elles prennent en considération les propriétés de l'aquifère mais aussi du contaminant considéré.

Pour chacune de ces méthodes, la procédure est globalement la même ; elle repose avant toute chose sur la sélection des paramètres ou des critères considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité des eaux souterraines. Chaque critère possède une gamme de variation naturelle qui peut être appréciée et subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Une valeur est attribuée à chaque intervalle reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination.

3.2.3. Description sommaire des méthodes à systèmes paramétrés

a) Les méthodes à systèmes matriciels (MS)

Ces méthodes utilisent deux paramètres considérés comme représentatifs de la zone étudiée. Les paramètres peuvent être la profondeur de la zone non saturée, la recharge de l'aquifère, la capacité d'infiltration des sols, ; ils sont subdivisés en un certain nombre de classes. Les deux paramètres sélectionnés et leurs classes sont ainsi les deux composants X_n et Y_m d'une matrice $n \times m$ (n étant le nombre de classes de X et m celui de Y). La combinaison de X_n et Y_m donne des degrés de vulnérabilité relatifs (d'extrême à faible en passant par fort et moyen, par exemple) (Vrba & Zaporozec, 1994).

Ces méthodes se basent sur un petit nombre de paramètres soigneusement sélectionnés, et sont principalement utilisées dans des études à petite échelle (Adams et Foster, 1992).

b) Les méthodes à systèmes indexés (RS)

Ces méthodes utilisent plusieurs paramètres ; chaque paramètre est subdivisé en classe avec une gamme de valeur déterminée, de sorte à estimer la vulnérabilité de manière adéquate. La somme des index est calculée par addition ou superposition des différents index des paramètres. La valeur numérique finale est subdivisée en différentes classes traduisant un degré de vulnérabilité relatif. Les méthodes suivantes appartiennent à ce groupe : la méthode GOD (Foster, 1987), la méthode « Pesticide Root Zone Model » (EPA, 1993), les méthodes GLA et PI, développées par le service géologique national allemand, la méthode AVI (Van Stempvoort et al., 1992) ou encore la méthode ISIS (De Regibus, 1994).

c) Les méthodes de pondération et d'indexation des paramètres (PCSM)

Cette méthode utilise la même approche que les méthodes à index (RS) ; la différence réside dans l'utilisation d'un système de pondération (coefficient multiplicateur) des différents index des paramètres. Ce système de pondération permet d'attribuer une importance relative plus importante à un paramètre par rapport aux autres dans

l'évaluation générale de la vulnérabilité des eaux souterraines. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode DRASTIC développée aux USA (EPA, Aller et al., 1985), la méthode SYNTACS développée en Italie par Civita (Civita et Benacchio, 1988; Civita, 1990, Civita et Maio, 1997a) et les méthodes récentes développées spécifiquement pour les milieux aquifères karstiques, telles que la méthode EPIK (Dörfliger, 1996) et RISKE (Pételet-Giraud et al., 2000) ou RISK (Dörfliger et al., 2004). Une approche simplifiée a récemment été développée par le BRGM ; elle ne prend en compte que deux paramètres , l'épaisseur de la zone non saturée et l'indice de développement et de persistance des réseaux (Mardhel et Gravier, 2005)

Toutes les méthodes de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque présentées ci-dessus sont fortement subjectives et leur validation est difficile. La caractérisation de la vulnérabilité est une approche qualitative et non quantitative ; une approche quantitative reviendrait à effectuer une modélisation hydrodynamique couplée au processus de transport. L'inconvénient d'utiliser une approche qualitative réside dans le fait qu'une propriété non précisément définie ne peut être déduite sans ambiguïté de la quantité mesurée. La question de la validation reste encore problématique.

3.2.4. La cartographie de la vulnérabilité spécifique

La vulnérabilité spécifique est un cas particulier de la vulnérabilité, mais qui n'est valable que pour un contaminant unique ou pour un groupe de contaminants. Les **propriétés des contaminants spécifiques** sont prises en considération en plus des critères relatifs à la vulnérabilité intrinsèque. L'objectif est d'effectuer une évaluation intégrée de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique, compatible pour les deux questions. La caractérisation de la vulnérabilité spécifique peut être considérée comme une **pondération spécifique additionnelle à la carte de vulnérabilité intrinsèque**.

Cette approche a été développée dans le cadre de l'action COST620; elle prend en considération les propriétés physiques et chimiques des différentes couches géologiques de l'aquifère et des formations sus-jacentes, ainsi que les processus de transfert et les propriétés des contaminants.

Le but est de créer une approche standardisée qui prend en considération les conditions géologiques et hydrogéologiques du bassin d'alimentation, appliqués à chacun des contaminants. Ceci nécessite plus que les données intrinsèques utilisées pour la cartographie de la vulnérabilité du même nom. Le concept retenu est général tout en étant suffisamment flexible pour utiliser des méthodes de pondération et de classification. Ces méthodes peuvent être adaptées en fonction de caractéristiques régionales présentes au sein du bassin d'alimentation ainsi que des intérêts particuliers des utilisateurs. La méthode présentée est une des possibilités d'application de ce type d'approche.

L'évaluation de la vulnérabilité spécifique nécessite ainsi la création de facteur additionnel permettant de corriger les valeurs obtenues de vulnérabilité intrinsèque. Ce facteur est désigné comme le **facteur de pondération spécifique** (facteur S), qui représente les capacités d'atténuation aussi bien du contaminant lui-même que des formations géologiques traversées (Illustration 38). Le calcul d'un tel facteur doit être le

résultat de la prise en compte d'un facteur pour les couches géologiques et d'un facteur pour le contaminant. Ces deux facteurs permettent ainsi l'évaluation de l'efficacité qui ne peut pas être déterminée de manière directe. Plus de détails peuvent être trouvés au sien du rapport complet de l'action COST 620.

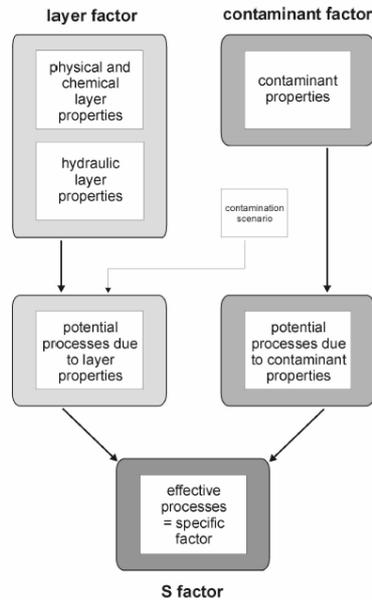


Illustration 38- Procédure simplifiée pour l'évaluation des paramètres de la vulnérabilité spécifique (COST 620 Action)

Des cartographies de la vulnérabilité spécifique aux pesticides ou la caractérisation de l'aléa contamination des eaux aux pesticides ont été mises en œuvre, à différentes échelles : entités géographiques homogènes à l'échelle d'une région (exemple Midi Pyrénées, RP-51456-FR), diagnostic régional et suivi de la contamination des eaux liés à l'utilisation des produits phytosanitaires (CORPEN, Groupe Phytopratt-SIG, mai 2003), cartographie du potentiel de contamination des eaux par les produits phytosanitaires pour la région Lorraine, ou encore à l'échelle d'un aquifère (Diagnostic phytosanitaires SYMPEC –PLANIS, février 2007).

L'approche retenue dans le cadre de ces études de diagnostic ou de caractérisation de la vulnérabilité, comprend une caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau (avec une distinction possible eaux de surface eaux souterraines) et une caractérisation des usages des produits phytosanitaires, afin d'aboutir à une **évaluation du potentiel de contamination**. La démarche de diagnostic, généralement issue de la méthode proposée par le CORPEN (Illustration 39) peut être résumée à l'aide des étapes suivantes :

- (i) caractérisation de la vulnérabilité des ressources (milieu physique)
- (ii) caractérisation de l'utilisation des produits phytosanitaires (« pression phytosanitaire »)

(iii) recensement des enjeux

(iv) évaluation du potentiel de contamination (croisement vulnérabilité x pression phytosanitaire)

(v) caractérisation typologique du risque (croisement potentiel de contamination x enjeux) et sélection de zones prioritaires pour un suivi.

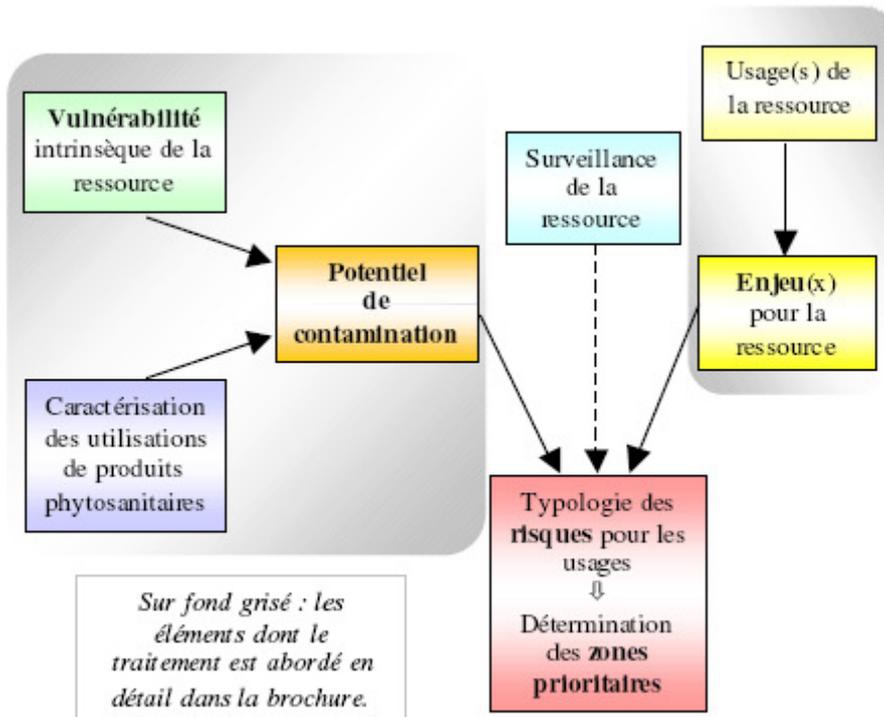


Illustration 39 - Schéma général de la démarche de diagnostic régional proposée par le CORPEN (GRAPPE Lorraine, 2006)

Les paramètres suivants sont pris en compte à l'échelle régionale :

Géologie	Pédologie	Hydrologie
Nature des formations	Perméabilité du sol Texture, structure	Type d'aquifère (libre, captif)
Perméabilité (fissures, interstices, ...)	Battance (ruissellement hortonien)	Type d'infiltration
	Hydromorphie	Ecoulements de surface
	Réserve utile	
	Matière organique	

La topographie n'est souvent pas prise en considération à cette échelle régionale ; elle doit être prise en compte à l'échelle des bassins versants. Les variations climatiques à l'échelle régionale si disponibles peuvent être considérées.

La géologie est le facteur déterminant pour le type de ressources en présence : eaux superficielles et/ou eaux souterraines. La pondération affectée aux paramètres est basée sur des dires d'experts pour les études menées en Lorraine et en Midi Pyrénées.

La vulnérabilité du milieu au transfert des produits phytosanitaires dans les eaux **dépend des caractéristiques du sol**, récepteur de ces produits. Les caractéristiques du sol conditionnent notamment la partition des eaux de pluie, entre **ruissellement** et **infiltration**. Les données nécessaires à la caractérisation du sol sont obtenues à partir de la carte morpho-pédologique établie par la chambre d'Agriculture régionale, selon des unités cartographiques de sol. Si la matière organique joue un rôle important vis-à-vis des transferts de produits phytosanitaires, ce critère n'a pas été retenu dans cette démarche, au vu du manque de données ou de données disparates à l'échelle de la zone d'étude. Pour les données relatives au sous-sol, les données de la banque de données du sous-sol (BSS) ainsi que le dire d'expert ont été utilisés ; les informations ponctuelles de la BSS ont été moyennées pour les unités de gestion déterminées.

Dans le cadre de l'étude SYMPEC-PLANIS (février 2007) à l'échelle d'un aquifère du Cotentin (aquifère de type craie sous couverture de formations argileuses), la méthodologie retenue, utilisant les informations à l'échelle de sondages et de forages, qui ont été extrapolé aux autres secteurs en appliquant un critère de similitude ou non du milieu naturel, prend en compte les facteurs suivants : carte d'iso-épaisseur des formations argileuses de surface, la profondeur du toit de la nappe. Cinq classes de vulnérabilité sont déterminées pour chaque facteur.

3.2.5. Comparaison des méthodes de cartographie de la vulnérabilité

Deux grands groupes de méthodes de caractérisation de la vulnérabilité peuvent être distinguées en plus de la distinction entre systèmes indexés et systèmes à indices et pondération ; il s'agit des **méthodes dont la cible de la caractérisation de la vulnérabilité est (i) la ressource** [écoulements dominés par une composante verticale au sein de la zone non saturée, transfert dans le sol, répartition entre écoulements et infiltration à la surface] et **(ii) le captage ou le forage dans le cadre de protection de source** [les écoulements concernés sont ceux qui se développent essentiellement au sein de la zone saturée de l'aquifère].

Parmi les méthodes présentées, toutes les méthodes à l'exception des méthodes DRASTIC, SINTACS et celles issues des groupes CORPEN pour un diagnostic produits phytosanitaires, peuvent être rattachées au 1^{er} groupe. La prise en compte de la zone saturée pour les méthodes DRASTIC, SINTACS et AVI passe par le critère de la conductivité hydraulique.

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sont appliquées à différentes échelles pour déterminer le potentiel de contamination des eaux souterraines. Les méthodes ne sont pas standardisées et ne peuvent ainsi fournir une évaluation unique de la vulnérabilité ; l'évaluation est ainsi sujette à une interprétation, pouvant conduire à des outils d'aide à la décision variés. La comparaison des résultats de différentes méthodes appliquées à un site nécessite d'utiliser uniquement les valeurs des indices sans système de pondération ou de classification (Neukum & Hötzl, 2007). Les

distributions statistiques résultantes sont comparées en calculant les percentiles de chaque distribution et en représentant par paire leur quantile (Isaak, 1989). Ces graphiques (quantile-quantile) peuvent être utilisées pour reclassifier les méthodes et ainsi les comparer. Les différences entre les cartes de vulnérabilités reflètent respectivement les procédures spécifiques d'identification des paramètres et de leur système de pondération et de classification. La reclassification à l'aide des moyennes des graphiques quantile-quantile permet d'obtenir des cartes proches les unes des autres, sans changer ou adapter les paramètres considérés ou les modes de pondération. Pour les aquifères karstiques, le paramètre principal à décrire est relatif aux processus d'infiltration.

Une étude comparative a été menée par une équipe italienne dans la région de Piana Campana au Sud de l'Italie. Il s'agit d'un large bassin sédimentaire d'environ 410 km² composé de dépôts alluviaux en alternance avec du matériel pyroclastique dérivé du Vésuve. Parmi les méthodes testées, Corniello et al. (1997) ont notamment utilisé DRASTIC et SINTACS décrites en annexe 4. Les autres méthodes utilisées dans cette comparaison sont :

- **GOD** (Foster, 1987) : système empirique qui permet de faire une évaluation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère, basé sur la détermination de "**G**roundwater occurrence" (type d'aquifère), "**O**verlying lithology" (sol) et "**D**epth to groundwater table (non confiné) or strike (confiné)".

- **AVI** (Van Stempvoort et al., 1992) : Cette méthode fait aussi partie des méthodes RS. Elle consiste à calculer un **A**quifer **V**ulnerability **I**ndex à partir de deux critères: l'*épaisseur* de chaque unité sédimentaire au-dessus de l'aquifère et une estimation de la *conductivité hydraulique* de chaque unité.

D'une manière globale, toutes les méthodes caractérisent les mêmes zones en zones de haute vulnérabilité (sauf GOD en particulier à cause des paramètres type d'aquifère et profondeur de la nappe; les auteurs donnent un index très faible aux aquifères semi-confinés qui sont considérés comme ayant un comportement similaire aux aquifères confinés). SINTACS semble être la méthode qui permet de décrire le plus précisément les environnements hydrologiques complexes à moyenne et grande échelle. La méthode AVI, même si elle est beaucoup plus simple donne des résultats comparables aux méthodes complexes pour les études à l'échelle régionale. Une étude de sensibilité entre les méthodes DRASTIC et SINTACS a été réalisée sur le même site de Piana Campana, Napolitano et Fabbri (1996) ont montré que chacun des 7 paramètres utilisés est très important dans le résultat final de la cartographie de la vulnérabilité.

Les principales méthodes exposées dans ce rapport sont présentées de manière synthétique dans le tableau de l'illustration 40 :

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

Méthodes	Paramètres													Remarque
	Type d'aquifères	Profondeur Nappe	Recharge	Infiltration	Type d'aquifères	Lithologie/Nature du réservoir	Sol	Topographie	Incidence zone vadose	Conductivité hydraulique	Epikarst	Degré de karstification	Autre	
DRASTIC	tout type	x	x		x		x (nature, > 1m)	x	x	x				
SYNTACS	tout type	x	x		x		x (nature, > 1m)	x	x	x				
EPIK	karst			x			x (épaisseur,	x			x	x		
RISKE	karstiques			x		x	x	x			x	x		
COP	karstiques			x		x (avec épaisseur)	x(épaisseur, structure, texture)	x					végétation / distance/	
PI	tout type et karstiques		x		x (captif, libre)	x	x (épaisseur)		x				fracturation	
DISCO	fissurés			x ruissellement			x(épaisseur, formation géologique de faible conductivité hydraulique)						discontinuités	
GALDIT	côtiers	x			x				x épaisseur zone aquifère	x			distance à la côte, impact intrusion saline	
LEA	tout type			x (temps d'infiltration estimé)			x(nature, épaisseur)							
"sans nom" - méthode n°2 (cf SYMPEC)	aquifère craie	x					x (épaisseur argile couverture)		x					pas de pondération, simple addition
Diagnostic CORPEN	tout type	x	x				x(épaisseur, battance, hydromorphie, ...)	x	x épaisseur, perméabilité, écoulements préférentiels	x épaisseur, perméabilité, écoulements préférentiels				drainage, densité hydrographique, pluies efficaces...

Illustration 40 : tableau comparatif des différentes méthodes de caractérisation de la vulnérabilité

La caractérisation des paramètres des différentes méthodes repose soit sur l'exploitation de bases de données, de documents cartographiques ou d'acquisition complémentaire de terrain (Illustration 41).

Paramètres	Données nécessaires	Méthodes complémentaires
Profondeur Nappe	piézométrie; réseau ADES, BSS	mesures ponctuelles
Recharge	données météorologiques	suivi pluviométrique additionnel
Type d'aquifères	carte géologique	études locales
Sol	carte morpho-pédologique	tarrière manuelle
Topographie	carte IGN topographique, MNT	
Incidence zone vadose	piézométrie, carte hydrogéologique, BSS	dire d'expert
Conductivité hydraulique	BSS, études locales	dire d'expert
Infiltration	reconnaissance de terrain, études locales	jaugeages différentiels
Epikarst	carte IGN topographique, photos aériennes	reconnaissance de terrain
Degré karstification	fonctionnement hydrogéologique	résultats essais de traçage
Discontinuités	carte géologique, photos aériennes	reconnaissance de terrain

Illustration 41 : tableau des principales données nécessaires pour la caractérisation des paramètres utilisés dans les différentes méthodes de cartographie de la vulnérabilité

Une remarque relative au temps nécessaire à la réalisation de la cartographie de la vulnérabilité peut d'ores et déjà être faite sur la base de l'étude du BRGM effectuée en Franche Comté (RP-53576-FR). Bien que le temps nécessaire à la réalisation de la cartographie multicritère de la vulnérabilité soit fonction de la taille du bassin d'alimentation ainsi que des données disponibles, on peut faire les estimations suivantes:

- (i) Pour un bassin d'alimentation de taille **inférieure à 5km²**, **une ou deux journées de terrain** sont nécessaires, pour effectuer des observations naturalistes et acquérir des données d'épaisseur de sol, ayant consulté auparavant l'ensemble des documents disponibles, le temps d'une journée.
- (ii) Pour un bassin d'alimentation d'une superficie de **50 à 100 km²**, il est nécessaire de compter au **minimum une semaine de terrain**, voir plus s'il est nécessaire d'acquérir des données relatives aux épaisseurs des sols, couverture protectrice. On peut compter deux jours de consultation des données existantes, au préalable des visites de terrain.

L'établissement des cartes par critère nécessite d'utiliser un logiciel de Système d'information géographique, permettant de « rasteriser » l'information (découpage de l'espace en une grille d'une maille régulière (20x20 ou 50x50 m). L'ensemble des cartes établis, la pondération et l'agrégation par analyse multicritère peuvent être effectuées. Des tests de sensibilité peuvent être réalisés en fonction des données, des doutes sur l'attribution d'un indice pour tel ou tel critère. Ce travail de traitement des données et de restitution sous forme de carte de vulnérabilité globale peut être réalisé en 5 à 8 jours.

3.3. CARTES DE VULNERABILITE REALISEES SUR LE BASSIN SEINE-NORMANDIE

La méthode IDPR/ZNS a été mise en œuvre sur l'ensemble du bassin Seine-Normandie (Mardhel et Gravier, 2005). Par ailleurs plusieurs cartes ont été élaborées au niveau départemental ou régional (cf. illustrations suivantes). Certaines d'entre elles ont été utilisées pour valider la méthode IDPR/ZNS.

3.3.1. Ile-de-France

Des cartes de vulnérabilité départementales ont été réalisées par le BRGM à la fin des années 70 et au début des années 80, donc avant le développement de la méthode DRASTIC. Ces cartes, à l'échelle du 1/50.000 ou du 1/100.000 ont été élaborées en utilisant globalement la même méthodologie, même si on trouve quelques différences d'une carte à l'autre. Elles concernent l'Essonne, les Yvelines (Illustration 43), le Val d'Oise (Vexin et Plaine de France), une partie de la Seine-et-Marne. Elles ont été reprises et assemblées sur l'ensemble de l'Ile-de-France par l'IAURIF (Illustration 42)

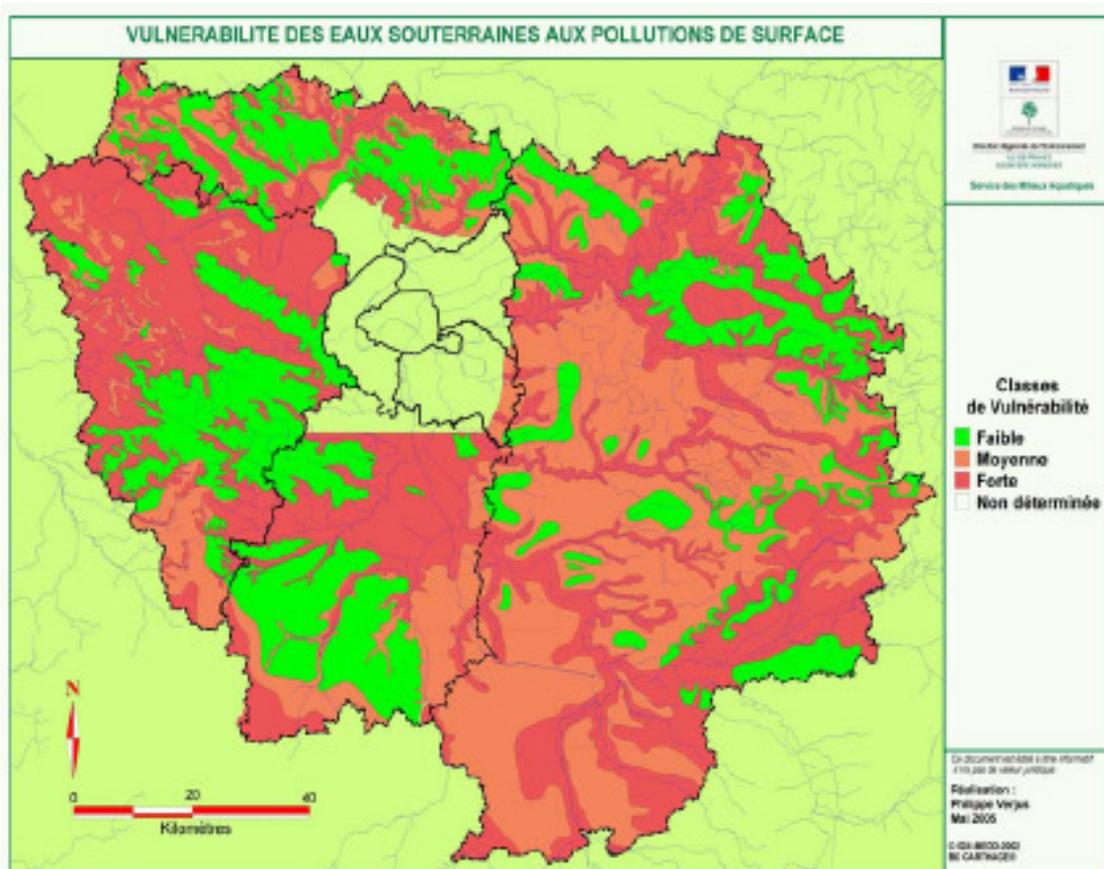


Illustration 42 – Vulnérabilité des eaux souterraines en Ile-de-France (source IAURIF)

Dans les études départementales, la vulnérabilité a été définie en 5 ou 6 classes essentiellement en fonction de la nature et de l'épaisseur des formations sus-jacentes (zone non saturée) et de la profondeur du niveau piézométrique. Ces critères ont été appliqués aux différentes nappes prise en compte.

Dans certains cas, d'autres critères, n'intervenant pas dans la vulnérabilité spécifique ont été pris en compte ; c'est le cas de l'Essonne où la vulnérabilité de chaque nappe a également été jugée en fonction des ressources en eau qu'elle est susceptible d'offrir.

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

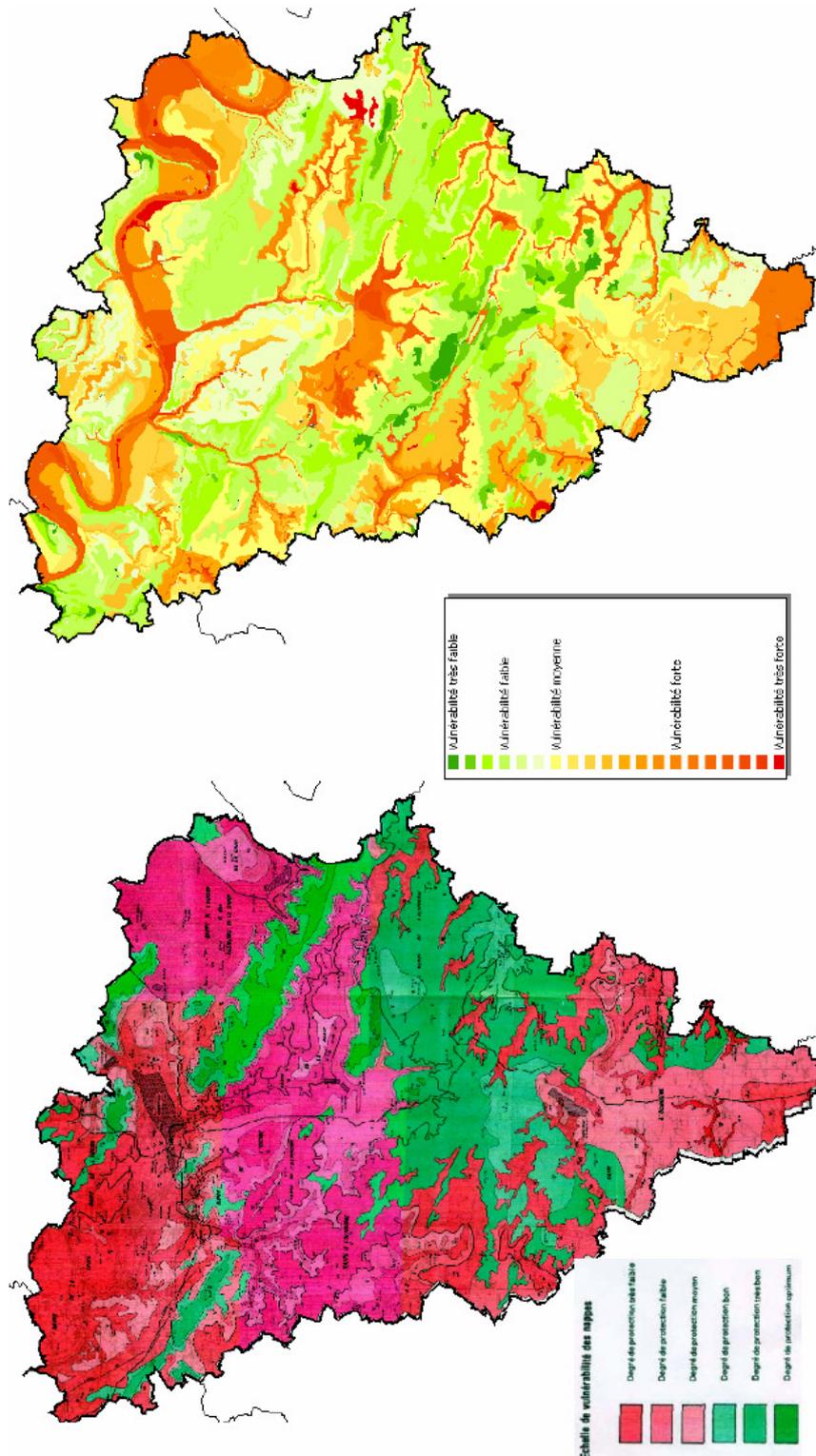


Illustration 43- Comparaison de la cartes de vulnérabilité des Yvelines (source: BRGM : 81 SGN 348 IDF) et de la carte établie avec la méthode IDPR/ZNS

3.3.2. Champagne Ardenne

En Champagne-Ardenne le BRGM a élaboré une carte de vulnérabilité spécifique vis à vis des nitrates de la zone d'affleurement du faciès crayeux du Turonien supérieur et du Sénonien (Illustration 44) (Rouxel et Baran, 2004).

La méthode élaborée par J. Ricour (1998) dans le cadre d'une application à la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais) a été utilisée et adaptée pour l'élaboration de la carte de référence.

Les 4 critères considérés sont

- la lithologie de recouvrement
- la topographie
- l'épaisseur de la zone non saturée
- la présence de tourbes (qui jouent un rôle de dénitrification)

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

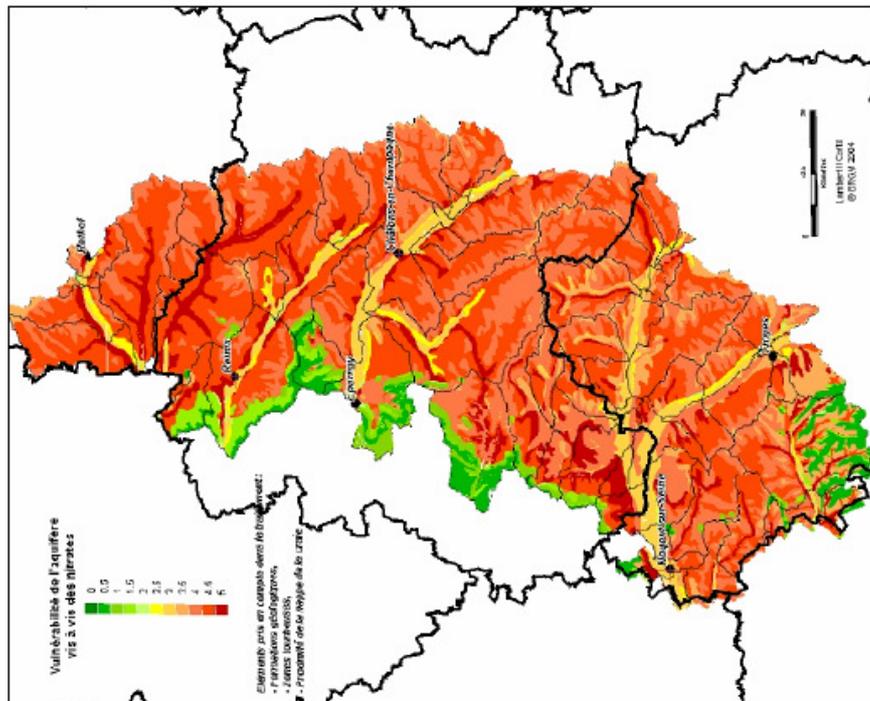
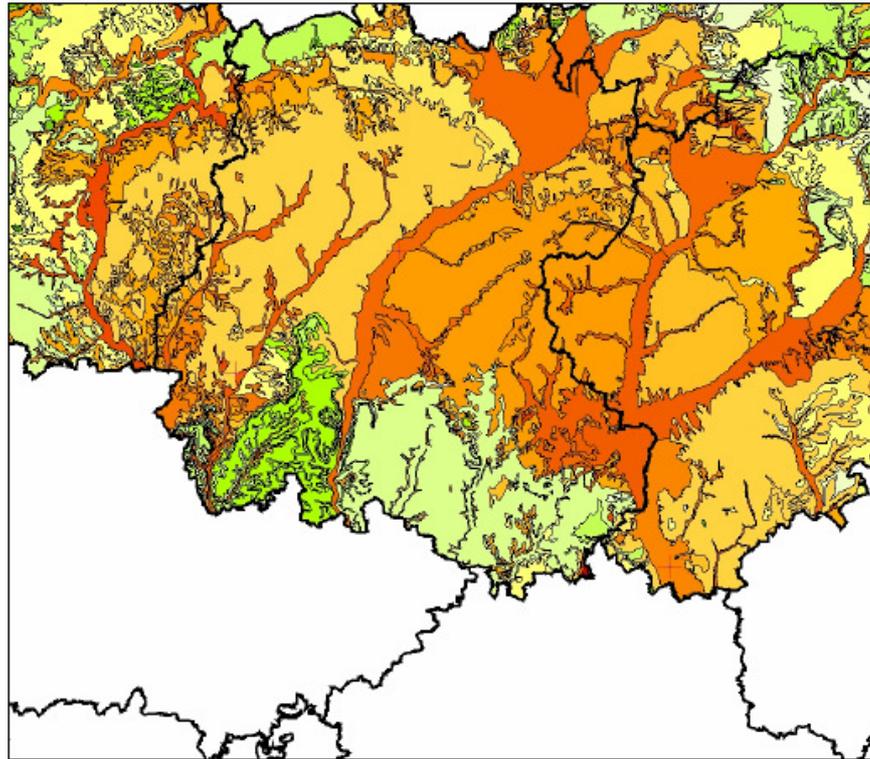


Illustration 44 - Comparaison des cartes de vulnérabilité en craie champenoise (en bas la méthode élaborée par J. Ricour, en haut méthode IDPR/ZNS)

3.3.3. Centre

En région Centre des cartes de vulnérabilité ont été élaborées à l'échelle départementale, selon une méthodologie identique, proche de la méthode DRASTIC (Martin, 2005). Les paramètres pris en compte sont les suivants :

- Pluie efficace
- Pente du terrain
- Existence ou non d'une formation géologique imperméable en couverture
- Perméabilité de l'aquifère
- Epaisseur de la zone non saturée

Toutes les cartes ont été réalisées selon une maille de 500 x 500 m

3.3.4. Bourgogne

Sur la Bourgogne, il existe une carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines basée sur la méthode DRASTIC (Jauffret et al., 2001a) (*Illustration 45*) et une carte d'aléa de pollution des eaux souterraines par les produits phytosanitaires (Jauffret et al. 2001b)

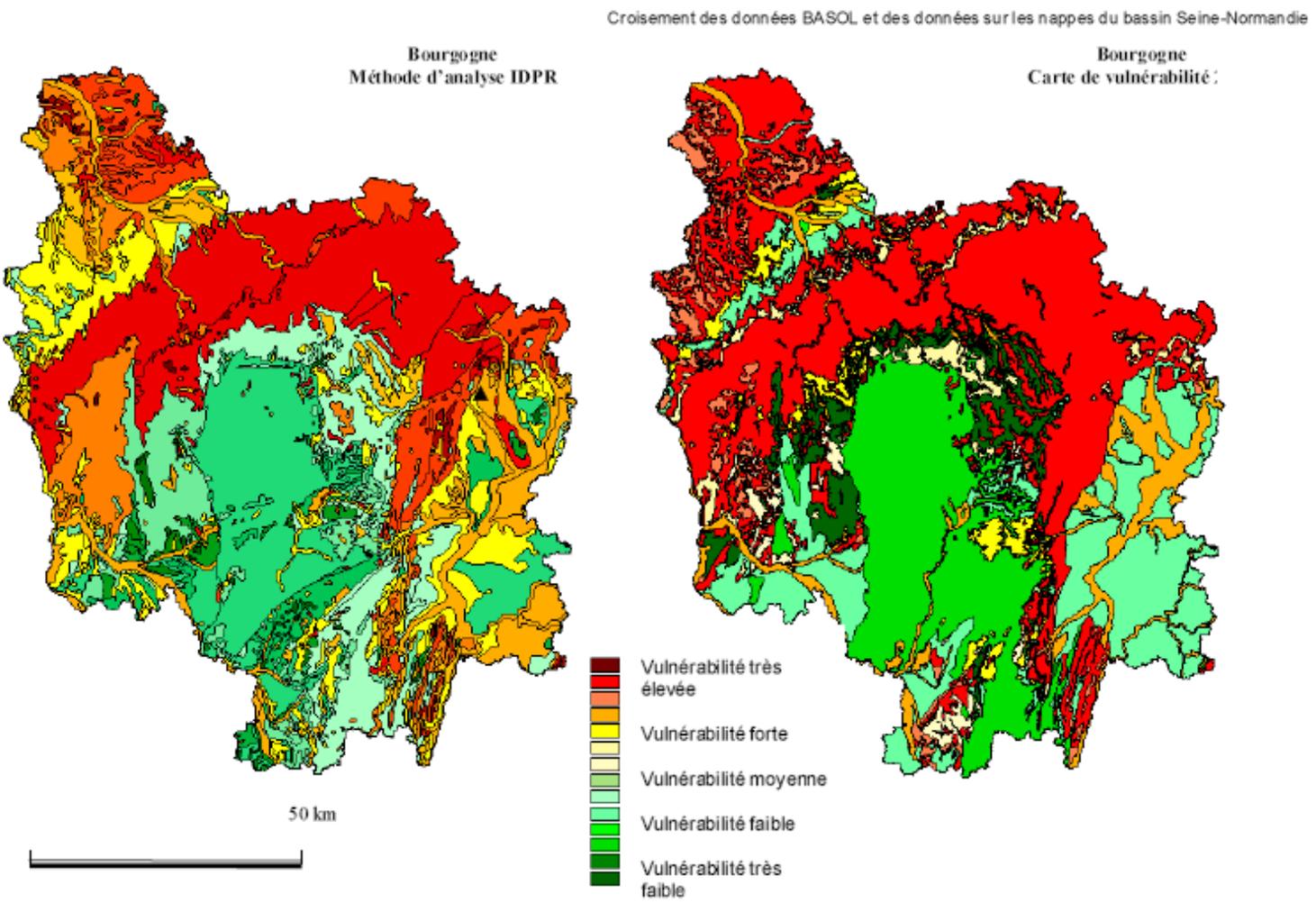


Illustration 45- Comparaison des cartes de vulnérabilité des eaux souterraines de Bourgogne établies avec les méthodes DRASTIC et IDPR

3.3.5. Picardie

Une étude récente vient d'être réalisée par ISL et CALLIGEE pour le compte de la DRAF de Picardie sur le zonage de la vulnérabilité des masses d'eau de la région Picardie à la pollution des eaux par les produits phytosanitaires (DRAF Picardie, 2007)

La démarche employée ici transpose les recommandations du CORPEN en les adaptant aux particularités locales et au jeu de données disponibles.

Les paramètres pris en compte pour la vulnérabilité intrinsèque sont les suivants :

- Pente des terrains
- Battance des sols
- Hydromorphie des sols
- Réserve utile des sols
- Colluvions et alluvions
- Différenciation texturale
- Sols filtrants

Par contre les données climatiques et les relations entre eaux superficielles et souterraines n'ont pas été prises en compte.

Pour chaque département, 16 cartes ont été produites :

- Carte 1 Pentés
- Carte 2 Battance
- Carte 3 Hydromorphie
- Carte 4 Réserve utile des sols
- Carte 5 Colluvions et alluvions
- Carte 6 Différenciation texturale
- Carte 7 Sols filtrants
- Carte 8 Vulnérabilité hydrogéologique des nappes
- Carte 9 Potentiel d'érosion des sols
- Carte 10 Potentiel d'entraînement des phytosanitaires
- Carte 11 Partition des écoulements
- Carte 12 Vulnérabilité intrinsèque des masses d'eau superficielles
- Carte 13 Vulnérabilité intrinsèque des masses d'eau souterraines
- Carte 14 Organisation du paysage
- Carte 15 Vulnérabilité actuelle des masses d'eau superficielles

- Carte 16 Vulnérabilité actuelle des masses d'eau souterraines

L'illustration 46 montre la carte de vulnérabilité des masses d'eau souterraines de l'Oise.

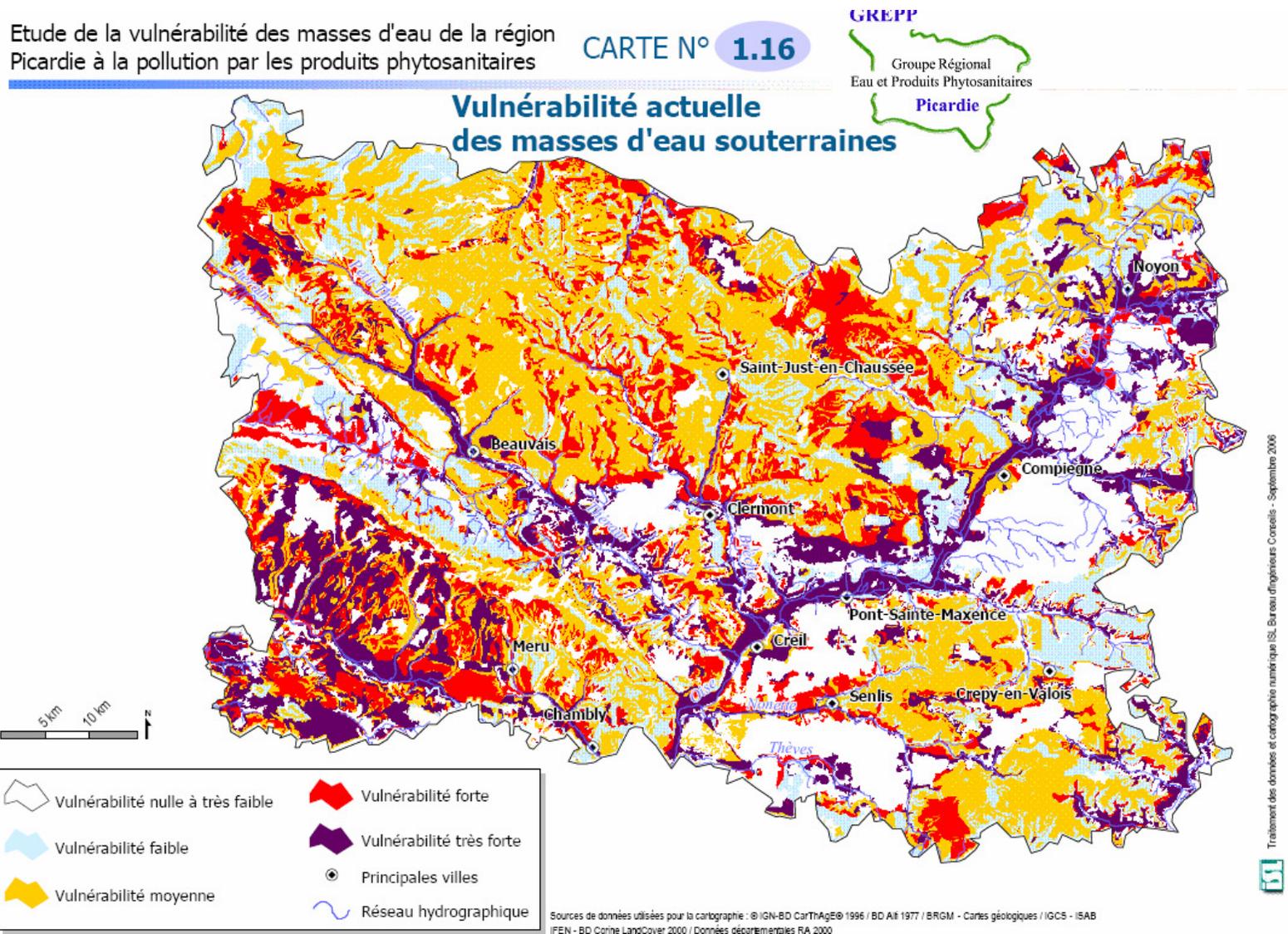


Illustration 46 – Carte de vulnérabilité des masses d'eau souterraines de l'Oise (source DRAIF)

3.3.6. Lorraine

Le GRAPPE Lorraine a réalisé en octobre 2006 une cartographie du potentiel de contamination des eaux par les produits phytosanitaires basée sur la méthode du CORPEN.

4. Analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie

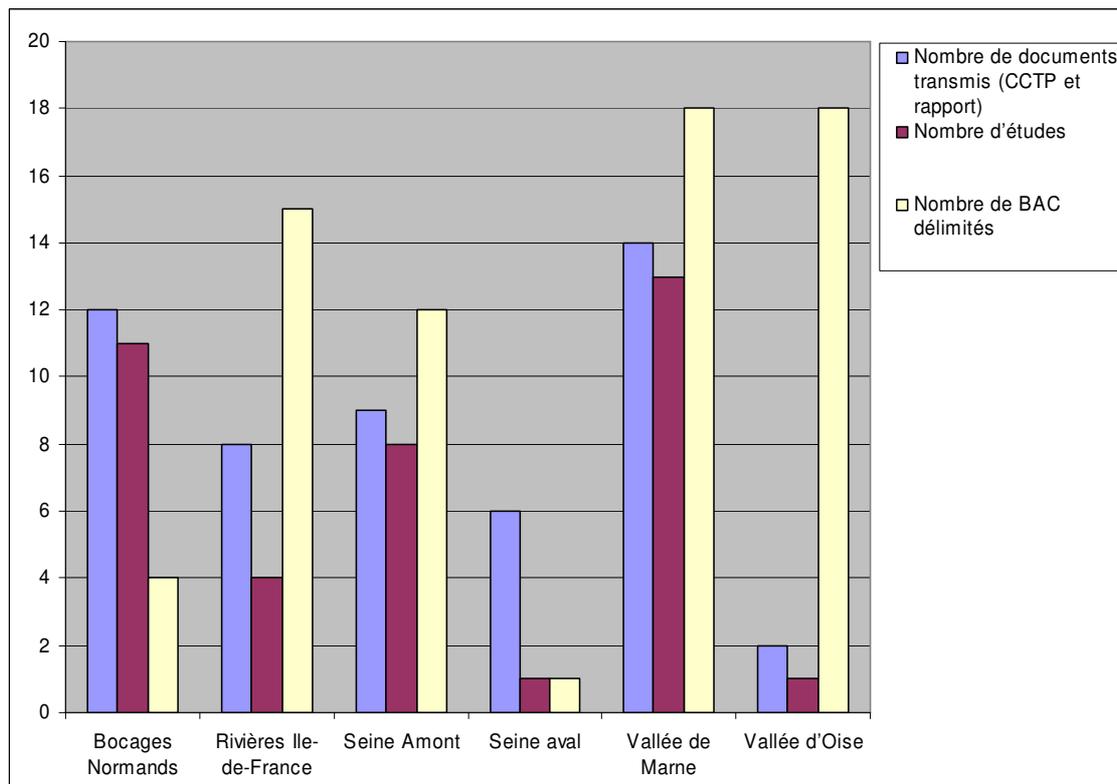
4.1. INVENTAIRE DES ETUDES ANALYSEES

La collecte des rapports d'étude effectuée par l'Agence de l'Eau Seine Normandie a permis de rassembler 6 CCTP et 45 rapports, correspondant à 38 études. Si quelques-unes ne concernent pas directement la délimitation d'un BAC, elles restent orientées vers la protection de la ressource souterraine exploitée pour l'AEP. On peut citer par exemple l'étude réalisée par le bureau d'études géologiques G. PIERSON préalable à la délimitation des périmètres de protection pour les communes de Moulton et Punay dans le Calvados (1994).

La liste complète des documents transmis est placée en annexe. Les études n°5 et n°28 n'ont pas été comptabilisées car non disponibles à la date de rédaction du rapport.

Les documents proviennent des différentes directions de secteur de l'AESN. Leur nombre est présenté par direction de secteur (Illustration 47) et par département (Illustration 48).

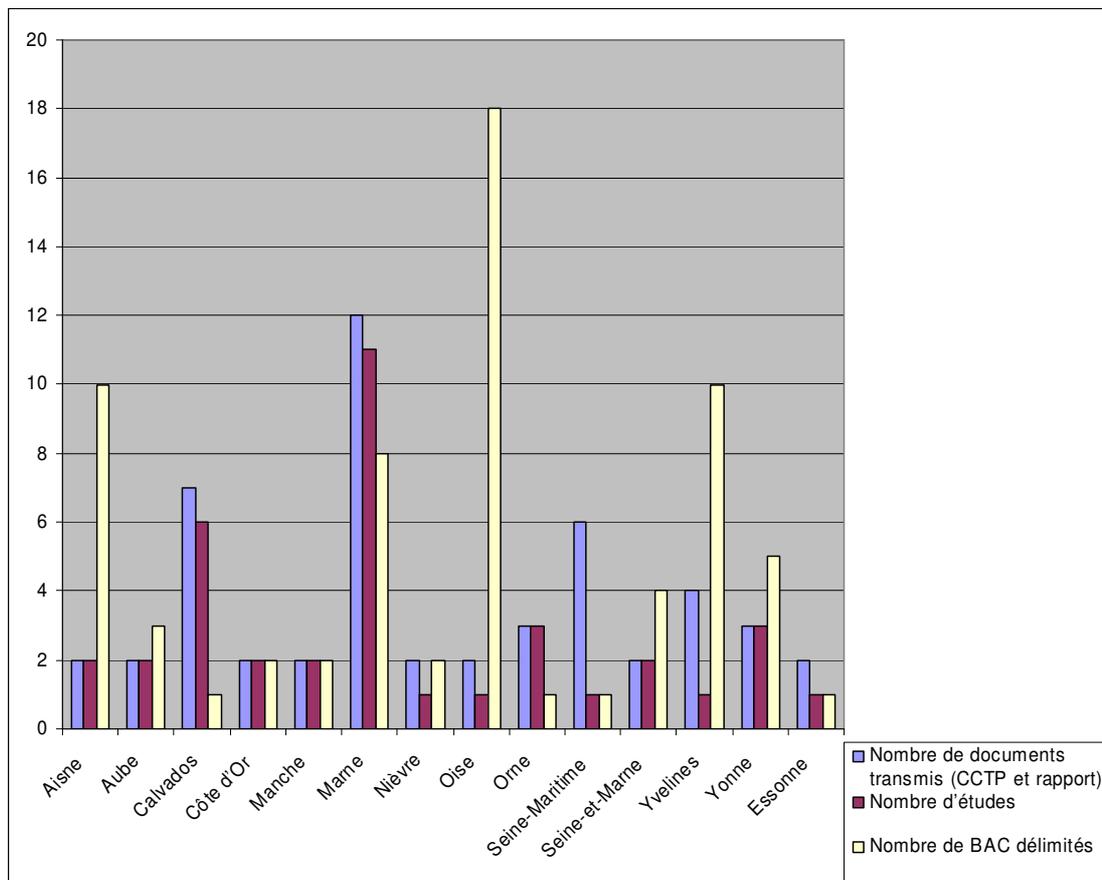
Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie



Direction de secteur	Nombre de documents transmis (CCTP et rapport)	Nombre d'études	Nombre de BAC délimités
Bocages Normands	12	11	4
Rivières Ile-de-France	8	4	15
Seine Amont	9	8	12
Seine aval	6	1	1
Vallée de Marne	14	13	18
Vallée d'Oise	2	1	18
TOTAL	51	38	68

Illustration 47 :: Nombre de documents transmis et de BAC identifiés par direction de secteur

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



Département	Nombre de documents transmis (CCTP et rapport)	Nombre d'études	Nombre de BAC délimités
Aisne	2	2	10
Aube	2	2	3
Calvados	7	6	1
Côte d'Or	2	2	2
Manche	2	2	2
Marne	12	11	8
Nièvre	2	1	2
Oise	2	1	18
Orne	3	3	1
Seine-Maritime	6	1	1
Seine-et-Marne	2	2	4
Yvelines	4	1	10
Yonne	3	3	5
Essonne	2	1	1
TOTAL	51	38	68

Illustration 48 - Nombre de documents transmis et de BAC identifiés par département

Les documents transmis ont été consultés en s'appuyant sur une fiche de dépouillement dans laquelle ont figuré les principaux items à identifier en vue de réaliser la synthèse. Une fiche a été établie pour chaque document : elles sont présentées en annexe à cette note. Les fiches ont été établies à partir d'une base de données sous ACCESS.

L'objectif des études réside principalement dans la reconquête de la qualité des eaux souterraines pompées par un captage d'eau potable. Cet objectif passe le plus souvent par la délimitation d'un BAC. Les autres objectifs rencontrés sont :

- étude préalable à la définition des périmètres de protection (3) ;
- délimitation du BAC (3) ;
- étude du fonctionnement d'un aquifère (1) ;
- évaluation des mesures préconisées dans le cadre des périmètres de protection d'un ouvrage (2) ;
- étude de vulnérabilité liée à l'augmentation de la capacité d'un champ captant (1) ;
- lutte contre les invasions salines en milieu côtier (2).

Les principales informations recueillies sont géographiques (commune, département, direction de secteur), organisationnelles (maître d'ouvrage, maître d'œuvre), hydrogéologiques (caractéristiques du captage, aquifère concerné, méthodes utilisées) et relatives aux investigations effectuées (modèle, traçage, pédologie, enquête agro-environnementale...). L'existence d'un plan d'actions ou d'indicateurs de suivi est précisée. Lorsqu'ils étaient disponibles, les indices de la Banque du Sous-Sol (qui permettent d'identifier de façon unique un captage) ont été intégrés dans la base de données.

L'ensemble des documents transmis (CCTP et rapports d'études) ont permis d'identifier une liste de 68 bassins. Ils sont localisés (de façon ponctuelle) sur trois cartes placées en annexe 8 et sont listés dans un tableau figurant en annexe 5. Deux cartes en A4 présentent les captages selon leur nature et selon le type d'aquifère capté, tandis qu'une carte en A3 permet leur localisation à l'aide d'une étiquette dans laquelle figure le nom de la commune concernée. La délimitation et la superficie des BAC ne sont pas toujours connues dans la mesure par exemple où certains BAC ne sont identifiés que par le CCTP dans le cadre duquel ils doivent être ou ont été réalisés.

Les **aquifères** concernés par les BAC sont présentés dans l'illustration 49. Les masses d'eau concernées sont présentées dans l'illustration 50. Dans ce tableau figure également le type de réservoir aquifère auquel elles correspondent, tels que définis dans le cadre de la caractérisation des masses d'eau souterraines. La nature karstique ou non de la masse d'eau est indiquée.

Aquifère	Nombre de BAC
Alluvions	3
Pliocène	2
Calcaires de Champigny	6
Calcaires du Lutétien	4
Sables du Cuisien	2
Craie sénonienne et Alluvions	6
Craie sénonienne	25
Cénomanién	4
Albien	1
Jurassique	6
Trias	1
Non précisé	8
TOTAL	68

Illustration 49 - Nombre de BAC identifiés par aquifères

Masse_eau	Nature	Karstique?	Occurrence
1012	Dominante sédimentaire	Non	5
3004	Alluvial	Non	2
3004 et 3208	Alluvial et Dominante sédimentaire	-	2
3101	Dominante sédimentaire	Non	2
3102	Dominante sédimentaire	Non	1
3103	Dominante sédimentaire	Oui	9
3105	Dominante sédimentaire	Non	3
3107	Dominante sédimentaire	Non	2
3201	Dominante sédimentaire	Oui	1
3202	Dominante sédimentaire	Oui	1
3205	Dominante sédimentaire	Non	12
3207	Dominante sédimentaire	Non	6
3209	Dominante sédimentaire	Oui	4
3211	Dominante sédimentaire	Oui	1
3217	Dominante sédimentaire	Non	1
3308	Dominante sédimentaire	Oui	1
3310	Dominante sédimentaire	Oui	2
3402	Dominante sédimentaire	Non	1
4061	Dominante sédimentaire	Oui	3
Indéterminée	Indéterminée	-	9
TOTAL			68

Illustration 50 - Nombre de BAC identifiés par masse d'eau

Le contexte prédominant est celui d'un aquifère sédimentaire à nappe libre, présentant une karstification dans 30% des cas environ.

Le **débit d'exploitation** des sites de captages est extrêmement variable : il varie de 27 m³/j environ (capacité de 8.5 m³/h pour l'étude n°26) à 16800 m³/j (capacité de 2700 m³/h, champ captant de Châlons-en-Champagne) et 100 000 m³/j. pour les sources de Provins captées par EAUDEPARIS (étude n°44).

4.2. DEFINITIONS

La lecture des différents documents laisse parfois entrevoir quelques incertitudes dans l'utilisation des termes associés aux zones des captages, ainsi que dans la qualification des « pluies ». Il a donc paru nécessaire de rappeler quelques définitions.

Celles figurant ci-après sont issues du lexique d'hydrologie proposé par l'UNESCO (<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/indexfr.htm>) ou du dictionnaire français d'hydrologie (<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/indexdic.htm#P>) :

Pluie efficace

Souvent rencontrée au pluriel, cette expression est utilisée en hydrologie et en agronomie dans des sens radicalement différents. Ainsi la définition hydrologique indique qu'il s'agit de la « fraction des précipitations génératrice d'écoulement, immédiat ou différé, superficiel ou souterrain. Comme les précipitations totales, elle s'exprime en hauteur (mm) rapportée à une unité de temps. » De ce point de vue, les précipitations efficaces incluent donc le ruissellement et l'infiltration contribuant à la reconstitution des réserves de l'aquifère. C'est cette définition qui est utilisée en hydrogéologie (cf. G. Castany, 1982). Elle exclut en particulier la partie qui sera interceptée par les sols.

A l'inverse, en agronomie, il s'agit de la « fraction des précipitations qui contribue à reconstituer la réserve du sol en eau utilisable par les plantes cultivées (la « réserve utile »). Elle s'exprime également en hauteur (mm) rapportée à une unité de temps. » Dans cette définition, les pluies efficaces excluent le ruissellement et l'infiltration contribuant à la réalimentation des aquifères.

Compte tenu des places prépondérantes occupées le plus souvent par l'hydrogéologie et l'agronomie dans les études dédiées à la lutte contre les pollutions diffuses au voisinage des captages d'eau potable, les maîtres d'œuvre des études présentent généralement une spécialisation dans l'un ou l'autre des domaines (Chambres d'Agriculture, bureaux d'études en hydrogéologie ou en hydrologie comme ANTEA, le BURGEAP ou SOGREAH). Afin d'éviter toute ambiguïté, il est donc essentiel de préciser la définition utilisée.

Dans la suite de cette partie, c'est la définition hydrologique qui sera employée.

Pluie utile

« Portion des précipitations qui contribue à la recharge des réserves en eau du sol. C'est, pendant une période donnée, la différence entre la pluie nette, la quantité d'eau évapotranspirée à partir de la zone non saturée, et éventuellement le ruissellement ». Elle renvoie en fait à la notion agronomique de « réserve utile ».

Cette définition de la pluie utile est pédologique : elle exclut notamment l'infiltration contribuant à la réalimentation de l'aquifère, qui est, elle, une part de la pluie efficace.

La notion de pluie utile est très peu utilisée en hydrogéologie.

Réserve Utile : la RU correspond d'un point de vue agronomique à la réserve d'eau utilisable par les plantes et d'un point de vue hydrogéologique à la capacité maximale de rétention en eau du sol. Concrètement, ceci correspond au volume d'eau emmagasiné entre le point de rétention (au-delà du point de rétention la percolation vers l'aquifère démarre) et le point de flétrissement par la tranche de sol explorée par les racines. Une fois le point de flétrissement atteint, une plante ne peut plus extraire de l'eau d'un sol : elle commence à flétrir.

Réserve Facilement Utilisable : la RFU correspond à l'eau « que les plantes peuvent facilement utiliser par leur tension osmotique sans avoir à freiner l'ETR ». En pratique, la croissance de la plante est ralentie lorsque la RFU est épuisée. La RFU correspond selon la FAO à 25 à 50% de la RU (le pourcentage varie selon la nature des plantes).

4.3. METHODES UTILISEES POUR LA DELIMITATION DES BAC :

4.3.1. Méthode cartographique

La délimitation est faite le plus souvent à partir d'une ou plusieurs **carte(s) piézométrique(s)**, en délimitant une zone d'alimentation comme on délimite un bassin versant en considérant un écoulement gravitaire (méthode hydrodynamique graphique).

Cette méthode est souvent complétée par une approche basée sur les **limites topographiques** dans les secteurs amont des bassins versants, souvent non couverts par une piézométrie lorsque la géologie change (c'est typiquement le cas d'un captage dans la craie dont les parties amont du bassin d'alimentation sont constituées par des terrains tertiaires). L'approche s'appuie assez souvent sur un **calcul de l'aire théoriquement nécessaire à la fourniture du débit au droit du captage** : on estime (sous forme de lame d'eau) la part de la pluie efficace qui va s'infiltrer annuellement et on détermine la surface correspondant au volume exploité annuellement au droit de l'ouvrage de production ou au volume annuel d'une source. *Ce calcul simple – a priori pas inintéressant – suppose la connaissance de la pluie efficace moyenne interannuelle et de la part de celle-ci qui va contribuer à la réalimentation de la nappe. L'une comme l'autre étant mal connues, la surface estimée peut varier du simple ou double... D'autre part, il suppose que les pompages effectués n'excèdent pas la ressource renouvelée annuellement (il convient donc de vérifier que l'on n'observe pas une baisse pluriannuelle du niveau piézométrique qui soit imputable à l'exploitation). Enfin, il n'est pas inutile de rappeler que tout calcul de bilan suppose de connaître les entrées et les sorties d'un système, toute approximation devant être effectuée en connaissance de cause.*

Dans un cas (étude du captage de Saints dans l'Yonne), une délimitation a été proposée en se basant sur les limites d'extension de l'aquifère (une autre étant basée sur les crêtes piézométriques Hautes Eaux et Basses Eaux). Les failles (ou plus généralement la tectonique) sont souvent citées comme éléments pris en compte.

Ce type de délimitation s'appuie souvent sur une connaissance locale du contexte hydrogéologique, indispensable notamment lorsque les cartes piézométriques ne

couvrent que partiellement la zone, qu'elles présentent des anomalies ou qu'elles sont utilisées à une échelle inappropriée par rapport à l'échelle de réalisation (par exemple : passage du 1/100000^{ème} au 1/25000^{ème} sans apport de nouvelles données).

Dans les délimitations rencontrées, on observe le plus souvent une vision statique du BAC alors que celui-ci est généralement dynamique : sa délimitation n'est a priori pas identique en situation de basses eaux qu'en situation de hautes eaux. Une approche de cette prise en compte des variabilités saisonnières a été effectuée dans le cadre de l'étude du BAC de Saints (département de l'Yonne ; étude n°1). Dans le cas du SIAEP de Chamoy – Saint-Phal (étude n°16), les surfaces des bassins délimités à partir des cartes HE et BE ont été cumulées.

4.3.2. Délimitation s'appuyant sur le calcul du rayon d'influence, de la zone d'appel et/ou des isochrones à 50, 100 et 200 jours.

Le rayon d'influence est souvent calculé en utilisant la formule de Jacob ou de Theis dans lesquelles on applique un rabattement nul (qui supposent notamment un milieu homogène, isotrope et d'extension illimitée, une nappe captive dont le gradient est nul et un ouvrage de faible diamètre). Les hypothèses de ces formules ne sont que rarement rencontrées mais elles sont simples à appliquer et de fait largement répandues. Elles nécessitent la connaissance de la transmissivité, du coefficient d'emmagasinement et de la durée de pompage.

Dans un cas, la méthode de Sauty et Thiery a été utilisée pour calculer l'extension de la **zone d'appel**. Elle fait appel à des abaques et s'appuie sur les données suivantes : le débit d'exploitation, l'épaisseur de la nappe au repos, la porosité cinématique de l'aquifère, la transmissivité et le gradient. Plusieurs cas sont représentables : puits unique dans un aquifère au repos, puits unique avec un écoulement régional, puits à proximité d'un cours d'eau et batterie de puits alignés.

Les isochrones peuvent être calculées par plusieurs méthodes, dont celle de Wyssling, souvent mais pas systématiquement reprise. Cette méthode nécessite la connaissance de l'épaisseur de l'aquifère et de la perméabilité, du gradient, de la porosité efficace et du débit d'exploitation de l'ouvrage. Elle suppose l'existence d'un milieu homogène et infini avec un puits unique. On commence généralement par calculer la largeur du front d'appel. Dans certains rapports (n°6, n°7 ou n°29 par exemple), ce calcul est effectué en considérant deux valeurs de porosité efficace, ceci étant fait afin de proposer un encadrement de l'extension des isochrones.

Aucun bureau d'étude n'a utilisé la méthode probabiliste dite de Monte-Carlo (cf. annexe 3). Cette méthode, qui consiste à calculer une valeur numérique à partir de procédés aléatoires, aurait permis de porter un regard sur la sensibilité du tracé des isochrones par rapport à la gamme des valeurs connues pour les paramètres utilisés. Dans notre cas, on aurait procédé à un tirage aléatoire de deux paramètres – la transmissivité et la porosité efficace – contraints dans des gammes de valeur – on fixe le maximum et le minimum – et on aurait calculé l'extension d'une isochrone. Répété

de nombreuses fois (>1000 par exemple), on crée un échantillon de valeurs que l'on va pouvoir caractériser par une médiane, un histogramme, etc...

Citée mais non utilisée, la formule de Hoffman et Lillich nécessite de disposer de mesures sur un piézomètre à proximité d'un forage lors d'un essai de pompage. Cette méthode itérative nécessite la connaissance du rayon d'influence et du rayon du forage, de la distance entre le forage et le piézomètre et de mesures piézométriques effectuées sur le forage et le piézomètre durant l'essai de pompage.

4.3.3. Utilisation de l'Analyse Factorielle Discriminante (AFD) :

Cette méthode de statistique multidimensionnelle a été mise en œuvre par un bureau d'études pour quatre captages voisins situés en milieu karstique (SIDEDA de Bolbec – Gruchet le Valasse). Suite à une investigation de terrains ayant permis d'identifier des indices de surface liés au phénomène de karstification (dolines, bétoires,...), le BE a tenté d'évaluer la probabilité de connexion entre ceux-ci et les captages. Les indices de surface ont été placés dans un espace à 5 dimensions : le risque d'érosion, la vulnérabilité de la nappe, la dénivelée, la distance et le gradient de la nappe entre le captage et l'indice.

Cette méthode s'appuie sur l'existence d'un échantillon dont le fonctionnement est déjà connu. Dans le cas cité, il était constitué de deux points (deux bétoires pour lesquelles un traçage a été effectué), dont un présenté comme douteux ; il a été élargi en considérant que des indices voisins géographiquement présentaient le même comportement. L'échantillon nous a donc apparu insuffisant.

4.3.4. Utilisation d'un modèle numérique

Une **modélisation** a été réalisée dans le cadre de trois études, sous la forme d'un modèle maillé.

Dans le cas du champ captant de Chalons-en-Champagne, la zone d'appel a été délimitée en complément du BAC.

Pour le champ captant de Couraux, la phase 1 de l'étude (rapport d'août 2006) propose une première cartographie des lignes de courant atteignant les captages, en se basant sur trois fonctionnements différents de la relation nappe-rivière. La modélisation à proprement parler doit être réalisée lors de la phase 2.

Pour le champ captant de Saint-Martin-la-Garenne, un modèle bicouche (alluvions et craie) a été conçu. Il est délimité par des crêtes piézométriques où des conditions de flux nul sont imposées et par des cours d'eau (la Seine dont le niveau est régulé par des écluses et la Vaucouleurs) pour lesquelles des charges sont imposées. Pour la Seine, la « cote la plus couramment mesurée » est utilisée. Après calage en régime permanent, le modèle estime la contribution de la Seine aux débits pompés (plusieurs scénarii) et définit des isochrones à 50 et 100 jours. Une délimitation du périmètre de

protection rapproché est proposée sur la base des isochrones à 50 jours. Le BAC en lui-même n'est pas délimité.

La mise en œuvre d'un modèle nécessite la connaissance et donc le cas échéant l'acquisition de nombreuses données. Celles-ci sont bien entendu destinées à la réalisation du modèle mais, avant cela, elles doivent permettre de comprendre le fonctionnement du système (sous forme d'hypothèses à valider a posteriori par le modèle). La phase de conceptualisation est essentielle, notamment pour la définition des conditions aux limites.

4.3.5. Utilisation de traceurs

Dans le cas des aquifères karstiques, la délimitation s'effectue souvent après réalisation de **traçages**.

Essentielle en milieu karstique, cette technique ne permet pas le plus souvent de délimiter directement un BAC mais plutôt de confirmer ou d'infirmer des hypothèses de fonctionnement d'un aquifère. En milieu karstique, les écoulements sont en effet marqués d'une forte anisotropie dont l'influence est d'autant plus importante que les vitesses de circulation sont rapides (plusieurs dizaines de m/h le cas échéant).

Les traçages sont souvent utilisés pour comprendre les circulations souterraines entre un point d'infiltration préférentiel et un captage mais ils sont aussi mis en œuvre pour comprendre les relations entre une nappe et les eaux de surface. Dans le cas d'un cours d'eau pérenne, un profil de jaugeages en long est parfois réalisé.

4.3.6. Synthèse des méthodes utilisées

Afin de pouvoir classer les méthodes utilisées lors de la délimitation des BAC, une **typologie** a été définie. Elle comporte les catégories suivantes :

- LT : les limites topographiques ;
- CG : la carte géologique (délimitation des aquifères) et le cas échéant la tectonique ;
- CH : carte(s) hydrogéologique(s) ;
- TR : traçages (milieu karstique). On a comptabilisé les traçages utilisés pour la délimitation du BAC, même s'ils n'ont pas été réalisés dans le cadre de l'étude ;
- BH : un bilan hydrologique a été conduit. Le plus souvent, il s'agit de calculer la surface du BAC à partir d'une infiltration estimée et du volume annuel exploité à un ouvrage (ou du volume annuel débité par une source) ;
- EA : des équations analytiques simples ont été utilisées. Il s'agit par exemple du calcul du rayon d'influence, de la largeur du front d'appel (méthode de Wyssling)...Si la méthode a été employée dans le cours du rapport mais n'a pas été utilisée pour la délimitation du BAC, elle ne figure pas dans le tableau final ;
- SN : simulation numérique. Un modèle a été réalisé.

Plusieurs méthodes peuvent bien entendu avoir été mises en œuvre lors d'une délimitation. Les méthodes utilisées ne sont connues que pour 36 des 68 BAC identifiés (les 32 BAC restant correspondant à 4 études et 4 CCTP). L'annexe 6 rend compte des types de méthodes utilisées pour chacun des BAC. Les illustrations ci-dessous montrent les méthodes utilisées par rapport à la nature du captage et au type d'aquifère.

Cette typologie montre l'utilisation assez fréquente des limites topographiques lors de la délimitation du BAC, celles-ci étant souvent prises en compte à défaut d'autres limites. Un bilan hydrogéologique sommaire est effectué afin de s'assurer de la cohérence des surfaces obtenues en regard des volumes pompés. Dans certains cas, cette approche est itérative : elle conduit à réviser la première délimitation proposée.

En domaine de socle, les exemples bas-normands montrent que la délimitation s'appuie sur la connaissance des accidents géologiques et la topographie.

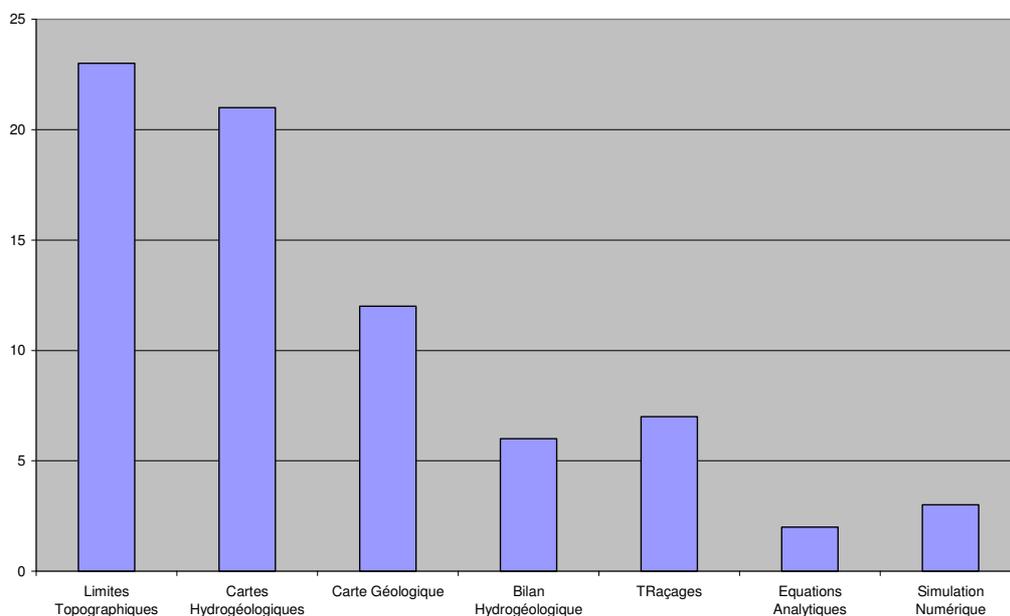


Illustration 51 - Méthodes utilisées pour délimiter les BAC dans les études et CCTP transmis par l'AESN

Méthode	Tout captages	Source	Puits	Forage
Limites Topographiques	23	10	6	7
Cartes Hydrogéologiques	21	10	5	7
Carte Géologique	12	6	5	1
Bilan Hydrogéologique	6	5	1	0
TRaçages	7	5	0	2
Equations Analytiques	2	0	1	1
Simulation Numérique	3	0	1	2

Illustration 52 - méthode utilisée pour la délimitation d'un BAC par type de captage

	Nombre BAC	LT	CH	CG	BH	TR	EA	SN
alluvial	3	1	1					2
karstique	18	8	13	6	4	6	1	
sedimentaire libre	10	10	5	5	1	1	1	
sedimentaire libre à captif	5	4	1	1	1			1
total	36	23	20	12	6	7	2	3

Illustration 53 : Méthodes utilisées pour la délimitation des BAC par contexte hydrogéologique

Cette analyse préliminaire a fait apparaître une grande diversité des méthodes utilisées, tout en mettant en lumière certains aspects essentiels à prendre en compte préalablement à la délimitation d'un BAC :

- Quel est le contexte hydrogéologique (karstique, alluvial, socle, captif, libre...) ? L'aquifère capté est-il alimenté par des phénomènes de drainance ou de déversement de nappe perchée située à l'amont ?
- L'infiltration se fait-elle de façon homogène sur le bassin versant du captage ? Existe-t-il des secteurs préférentiels ?
- Le cas échéant, quelle est la nature de la relation nappe-rivière ?
- Observe-t-on une baisse chronique du niveau piézométrique statique au voisinage de l'ouvrage qui soit imputable aux pompages ?
- Quelles sont les données disponibles et quelle fiabilité leur attribuer ?

Enfin, plusieurs cartes ont été rencontrées sans échelle (études n°1, 13, 16 ou 32 par exemple). Si l'utilisation de fonds topo IGN © par les BE permet de la reconstituer (par les graticules), cette absence rend l'utilisation des cartes plus difficile, voire impossible pour un profane.

4.4. SURFACE DES BAC

L'illustration 54 présente la taille (moyenne, médiane, minimum, maximum) des BAC par direction de secteur de l'AESN. Les valeurs sont indicatives dans la mesure où certaines surfaces ont été estimées à partir des documents transmis, les BAC n'étant pas disponibles dans un format SIG vectorisé.

SECTEUR AESN	BAC avec surface	Surface moyenne	Surface médiane	Surface mini	Surface maxi
DBN	3	5.7	4.0	3.0	10.0
DRIF	5	46.9	35.0	5.4	86.0
DSAm	12	17.9	10.0	1.3	88.2
DSAv	1	6.5	-	6.5	6.5
DVM	14	23.7	4.9	1.0	200.0
DVO	17	8.8	7.5	4.0	20.0

Illustration 54 - Surface des BAC (en km²) par direction de secteur de l'AESN

La surface des BAC délimités est souvent – mais pas toujours – fonction des volumes exploités, ce qui explique sa variabilité. Le BAC de 200 km² correspond au champ captant de Châlons-en-Champagne. Compte tenu de son extension, le bureau d'études a spécifié la zone d'appel des captages (par modélisation).

Concernant la direction vallée de la Marne, on s'aperçoit que la valeur médiane est bien inférieure à la moyenne, ceci étant due à la coexistence sur ce secteur de deux grands BAC (66 et 200 km²) avec une majorité de BAC de faible extension (< 5 km²). La moyenne est dans ce cas peu représentative de la majorité des cas.

L'illustration 55 montre la forte hétérogénéité de la surface des BAC délimités en domaine karstique.

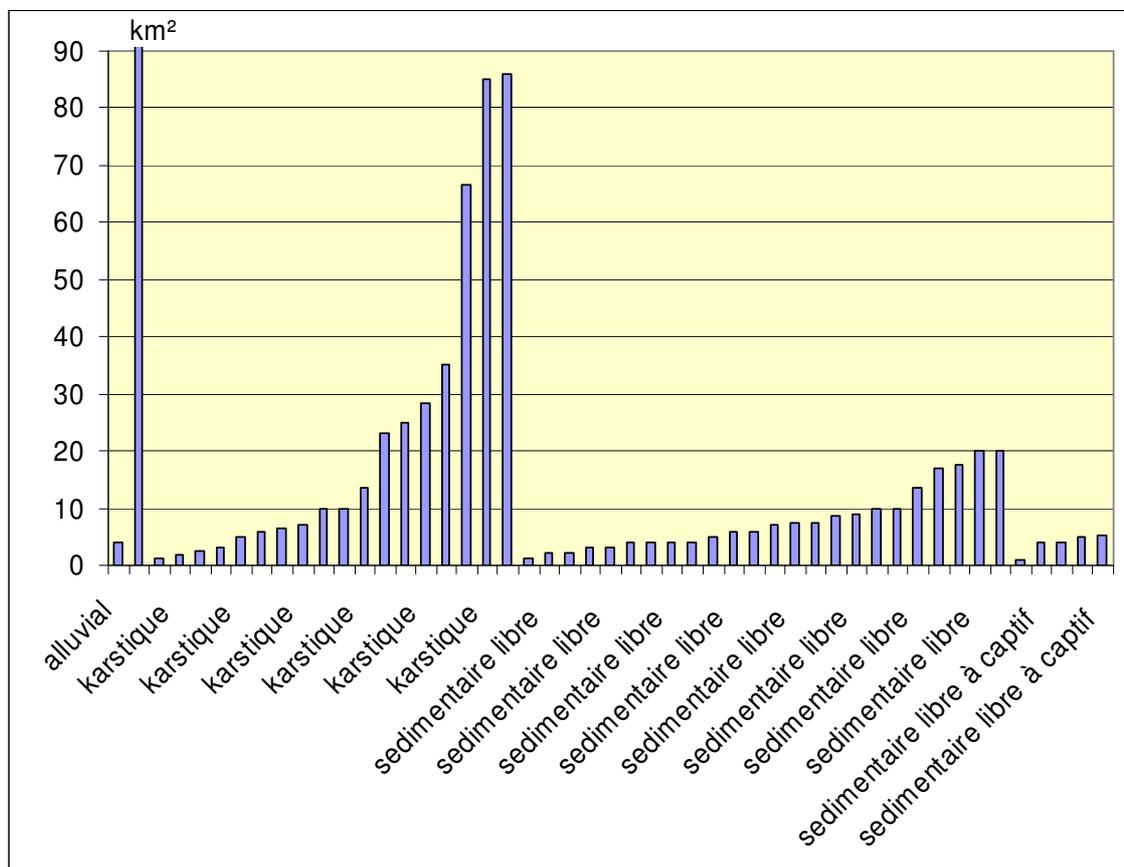


Illustration 55 : Surface des BAC par contexte hydrogéologique

4.5. ANALYSE DE LA VULNERABILITE DANS LES ETUDES TRANSMISES

Afin d'appréhender les démarches suivies par les BE, les critères pris en compte ont été classés en dix familles, inspirées de la méthode DRASTIC (ni utilisée, ni citée dans les rapports bien qu'elle ait probablement inspiré bon nombre de démarches). Les cartes de vulnérabilité – quand elles existent – ayant été établies sur l'ensemble de la zone d'étude, les critères sont définis par étude et non par captage :

- D : épaisseur de la zone non saturée ;
- R : recharge
- A : nature de l'aquifère ;
- S : type de sol ;
- T : pente du terrain ;
- I : nature des terrains compris entre la base du sol et le niveau de la nappe ;
- K : indices karstiques (dolines, pertes,...) ;
- OS : occupation des sols ;
- PC : proximité du captage ;
- PH : Proximité du réseau hydrographique ;
- EH : environnement humain (zones urbaines, vignes...).

L'illustration 56 présente l'occurrence des critères pris en compte dans les études transmises. L'illustration 57 précise le contexte hydrogéologique et l'illustration 58 détaille les critères utilisés pour chaque BAC concerné.

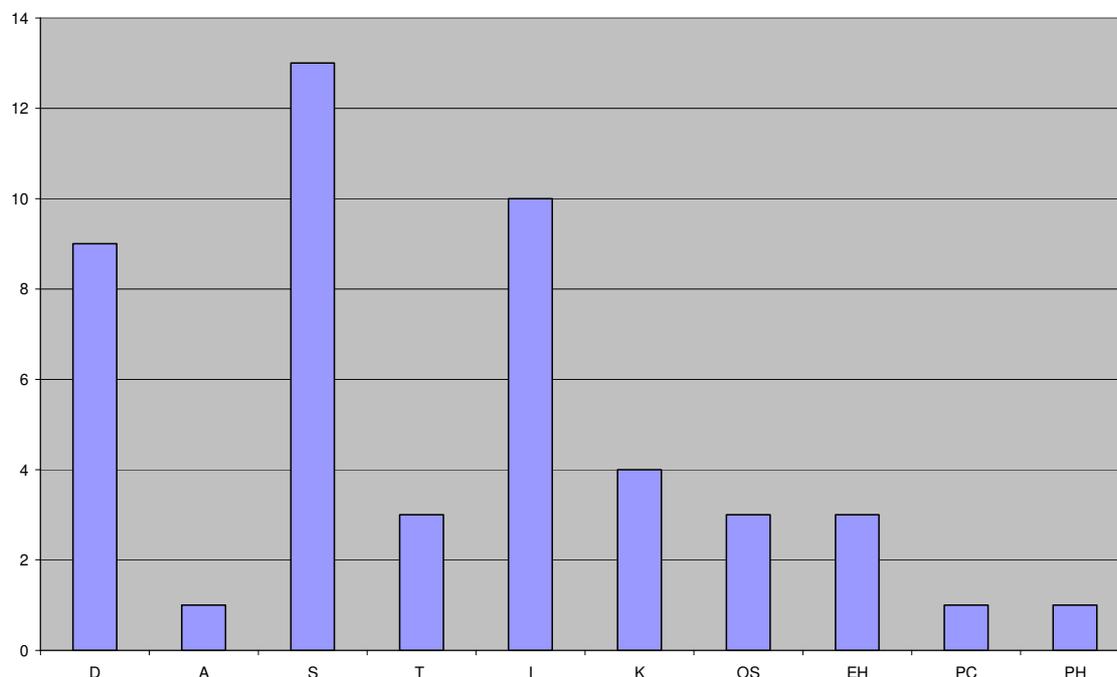


Illustration 56 - Critères pris en compte pour la détermination de la vulnérabilité dans les études consultées

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

C'est donc principalement le sol puis l'épaisseur et la nature de la ZNS qui sont pris en compte.

	Nombre Etude	D	R	A	S	T	I	K	OS	PC	PH	EH
alluvial	2	1			2	1	1				1	
karstique	7	5		1	5	2	6	4	2			1
sedimentaire libre	3	1			3		1			1		1
sedimentaire libre à captif	3	2			3		2		1			1
total	15	9	0	1	13	3	10	4	3	1	1	3

Illustration 57 : Critères pris en compte pour la détermination de la vulnérabilité en fonction du contexte hydrogéologique

Aquifere	Masse eau	Nature captage	Methode BAC	Methode vulnerabilite	Surface (km2)
alluvial	3004 et 3208	33 puits, 3 puits à drains rayonnants et 2 forages	SN	D, S, PH	200
alluvial	3207	10 forages	SN	S, T, I	
karstique	4061	source	BH et TR et CG et LT	D, A, S, I, K	7
karstique	4061	puits	CG et LT	D, A, S, I, K	25
karstique	3103	3 puits forés	CG et CH	D, I	35
karstique	3202	3 forages et 1 puits	CH et TR	D, S, K	6.5
karstique	4061	source	CG et CH	D, S, T, I, K, OS	28.5
karstique	3207	forage	CH	D, S, T, I, OS, EH	13.6
karstique	3308	forage		S, I	10
sedimentaire libre	3217	forage	CH et LT et TR et CG	I, S, PC	2.1
sedimentaire libre	3101	forage	LT	S	3
sedimentaire libre	3207	forage	CH	D, S, EH	3
sedimentaire libre	3209	forage	CH et LT	S	17
sedimentaire libre à captif	3207	forage	CH et LT	D, S, I, OS, EH	4.9
sedimentaire libre à captif	3107	puits	BH et LT	S	5.37
sedimentaire libre à captif	3101	forage		D, S, I	
karstique	3103	source	CH et TR	I, K	23
karstique	3103	source	CH et TR	I, K	85
karstique	3103	source	CH et TR	I, K	86

Illustration 58 : Détail par étude des critères utilisés pour la détermination de la vulnérabilité

La **méthode INDIGO** est rencontrée dans plusieurs études, notamment dans celles réalisées par les chambres d'agriculture. Développée par l'INRA de Colmar, cette méthode comporte **une dizaine d'indicateurs agro-environnementaux** (azote, pesticides, phosphore, irrigation, matière organique, assolement, rotation, couverture du sol, énergie...) qui caractérisent l'impact environnemental des pratiques agricoles au travers d'un tableau de bord parcellaire. C'est souvent l'indicateur azote représentant le risque de lessivage des nitrates qui a été utilisé. Il est calculé pour deux périodes (printemps et hiver) à partir de données pédoclimatiques, de la rotation des cultures, de l'itinéraire technique de fertilisation (dates, quantité et formes) et de la période d'adsorption maximale de l'azote notamment.

Parmi les autres éléments rencontrés lors de la consultation des documents, on peut citer ou faire les remarques suivantes :

- en tant que facteur dégradant la protection naturelle d'un aquifère, les puits et forages recensés en BSS ont été cartographiés par un BE dans le cadre d'une étude (captages de Vulaines-sur-Seine en Seine-et-Marne, étude n°29). *En effet, selon les caractéristiques des ouvrages, les puits et forages peuvent présenter un réel danger pour les nappes d'eau souterraines.*
- dans certaines études (6 ou 7 par exemple), la vulnérabilité intrinsèque n'est pas déterminée : c'est directement le risque qui est présenté, sans que l'on puisse faire clairement la part des choses entre la sensibilité du milieu et l'activité anthropique engendrant le risque.
- dans le cadre de l'étude du bassin d'alimentation du captage de Bouy (n°6), le BE a réalisé quatre profils azotés dans la zone non saturée de l'aquifère crayeux dans le but d'évaluer les vitesses de migration des nitrates. *Les vitesses obtenues de cette manière sont généralement très lentes (inférieures à 1 m par an) ; il est beaucoup plus difficiles de les évaluer dans des milieux fissurés ou karstiques.*
- dans le cadre de l'étude du champ captant de Saint-Martin-la-Garenne (étude n°27), le BE a utilisé son modèle maillé pour réaliser six simulations de propagation d'un polluant dans la nappe. Les propagations considérées sont purement hydrodynamiques, ne prenant pas en compte d'éventuels processus d'adsorption et de dégradation.

Les méthodes utilisées sont souvent orientées par les thématiques dominantes des maîtres d'œuvre. Ainsi, une Chambre d'Agriculture utilisera des critères agronomiques tandis que le bureau d'études spécialisé dans les eaux souterraines favorisera ceux liés à l'hydrogéologie.

Conclusion

Ce travail de synthèse a permis de présenter des méthodes de délimitation d'un bassin d'alimentation de captage, une méthode de délimitation des zones contributives à l'alimentation du captage et des méthodes de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines.

Il s'agit, à partir de là, en fonction des types d'aquifères présents sur le bassin, de définir des méthodologies de délimitation d'un bassin d'alimentation de captage et des zones sensibles aux pollutions diffuses. Pour cette seconde étape, basée sur une analyse multi-critères et dans la mesure où certains des critères à prendre en compte sont utilisés à la fois pour la cartographie des zones contributives et la cartographie de la vulnérabilité, nous allons définir les critères pertinents issus des deux méthodes et proposer une nouvelle analyse multi-critères, adaptée à chaque type d'aquifère (Illustration 59).

Nous établirons également pour chaque critère, la manière de l'évaluer (données nécessaires, si elles existent, si on peut les calculer, s'il faut les mesurer, ...), avec différents degrés de précision (selon la surface du BAC, en fonction de critères économiques, ...)

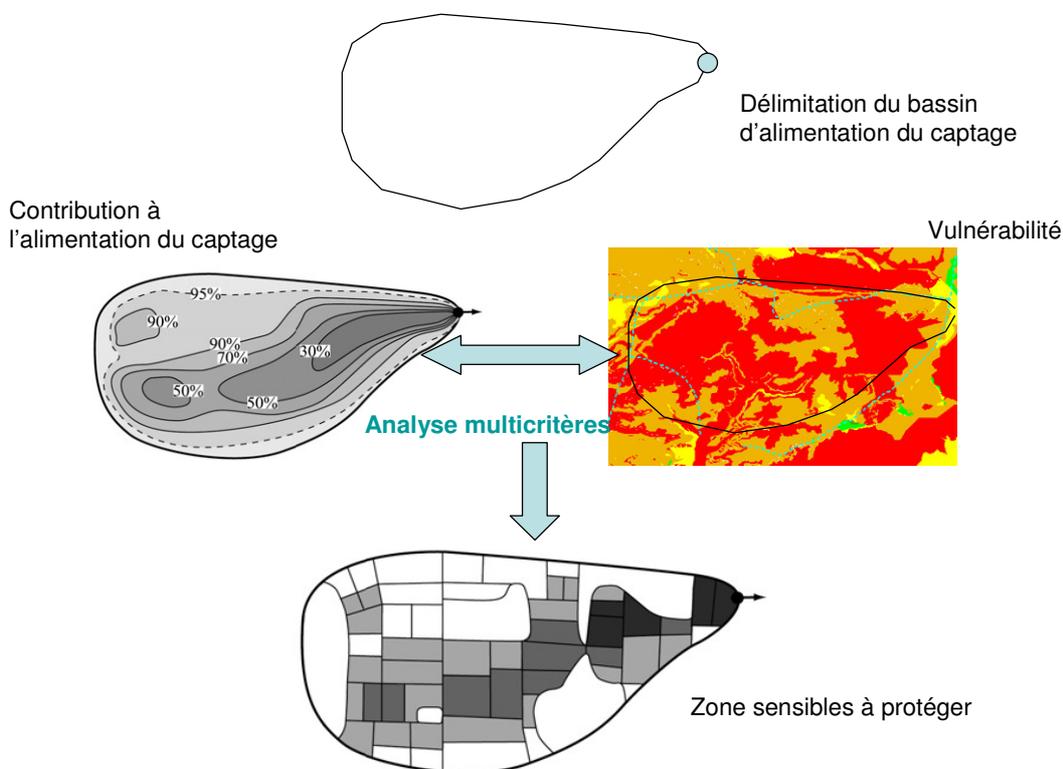


Illustration 59 – Approche proposée pour la suite de l'étude

Références bibliographiques

Adams B. et Foster S.S.D., (1992) : Land-surface zoning for groundwater protection, *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, Institution's annual symposium Groundwater pollution and aquifer protection in Europe, Paris, France, vol 6, n°3, pp 312-320.

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.

Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée et Corse (2005) – Bilan et analyse de la mise en œuvre des procédures de protection des captages AEP en milieu karstique

Albinet M. & Margat J. (1970) - Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine – Bull. BRGM, 2ème série, 3(4): 13-22.

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. and Hackett, G. (1987) – DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455 pp.

Andersen L J and Gosk E. (1987), Applicability of vulnerability maps, In *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution*, edited by W van Duijvanbooden and H G van Waegeningh, [Proceedings and Information No. 38 of the International Conference, the Netherlands, 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands]

Andersen, L.J. and Gosk, E. (1989) – Applicability of vulnerability maps. *Environmental Geology Water Sciences*, **13**(1), 39-43.

Bakalowicz, M. and Plagnes, V. (1998) – La protection des ressources en eau souterraine en région karstique. Eléments de réflexion pour une politique d'aménagement raisonné. *Hydrogéologie*, **4**,23-27.

Banton O., Bangoy L.M., 1997. Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines. Ed. Presses de l'université du Québec. 460 p.

BCMELP (2000). – Well Protection Toolkit. British Columbia, Ministry of Environment, Lands and Parks. 227 p.

Bear J., Jacobs M. (1965) – On the movement of water bodies injected into aquifers, *Journal of Hydrology* **3**, 37-57;

Bekesi, G. and McConchie, J. (2000) – Empirical assessment of the influence of the unsaturated zone on aquifer vulnerability, Manawatu region, New Zealand. *Ground Water*, **38**(2), 193-199.

Bérard.P., Lachassagne.P., Lemordant.Y., Petit.V., Talbo.H (1998) – Les périmètres de protection en milieu fissuré : exemples et principes d'application, rapport BRGM/RR-40289-FR

Blaise M., Marchal J.P., Desprats J.F. (2004) - Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines et de la productivité de la ressource en région Languedoc-Roussillon. Rapport final. BRGM/RP-53241-FR

Boussinesq, J. (1904) - Recherches sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *J. Math. Pures applied* (5), 10, n°1.

Bradbury, K.R. et M.A. Muldoon. (1994) - Effects of fracture density and anisotropy on

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.

Bussard, T., Tacher, L., Parriaux, A., Bayard, D., Maitre (2006). – Methodology for the delineating of groundwater protection areas against persistent contaminants. *Quarterly journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 39, 97-109

Bussard, T., Tacher, L., Parriaux, A., Bayard, D., Maitre, V. (2004). – Dimensionnement des aires d'alimentation Zu, Documents environnement n° 183, OFEFP, 143 p.

Castany G., Margat J. (1977) – Dictionnaire français d'hydrogéologie, BRGM Editions

Chachadi A G and Lobo Ferreira J P, 2001 : Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method, Newsletter COASTIN N°4 March 2001.

Cho,M., Choi,Y., Ha,K, Kee,W., Lachassagne, P., Wyns, R. (2002).- Paleoweathering covers in Korean hard rocks: a methodology for mapping their spatial distribution and the thickness of their constituting horizons. Applications to identify brittle deformation and to hard rock hydrogeology.- *KIGAM Bulletin (Korean Institute of Geoscience and Mining Bull.)*, vol. 6, n°2, September 2002, pp. 12-25.

Cho,M., Choi,Y., Ha,K, Kee,W., Lachassagne, P., Wyns, R. (2003): Relationship between the permeability of hard rock aquifers and their weathering, from geological and hydrogeological observations in South Korea, International Association of Hydrogeologists IAH Conference on "Groundwater in fractured rocks", Prague 15-19 September 2003,Prague.

Civita M, De Regibus C (1995) Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquifer [Examination of methodologies for assessing aquifer vulnerability]. *J Appl Geol* 3:63–71.

Civita M. & de Maio, M. (2000): Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5. – 248 p; Bologna (Pitagora Editrice).

Civita, M. (1994) – Data needs and presentation. *In*: J. Vrba and A. Zaporozec

(Editors), Guidebook on mapping Groundwater vulnerability. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 57-73.

Civita M. & de Maio, M. 1997. SINTACS Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automazione. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.

Civita, M., 1990.a. La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Atti 1° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", 3, Marano sul Panaro, pp. 39-86.

Clark-Labs (2000) – IDRISI : GIS and Image Processing. V32.02. Windows PC. Clark University. Worcester, USA

Corniello, A., Ducci, D. y Napolitano, P. (1997): "Comparison between parametric methods to evaluate aquifer pollution vulnerability using a GIS: An example in the 'Piana Campana', Southern Italy", en Marinos, P., Koukis, G., Tsiambos, G. y Stournaras, G. (Eds.): Proceedings International Symposium on engineering geology and the environment. Rotterdam, Balkema, pp. 1721-1726.

CORPEN (2003) - Eléments méthodologiques pour un diagnostic régional et un suivi de la contamination des eaux liée à l'utilisation de produits phytosanitaires, Groupe Phytopratt, 84 p

COST 65 (1995) - Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, Final report (COST action 65). – European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Report EUR 16547 EN: 446 p.; Brüssel, Luxemburg.

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

Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S., Popescu I.C. and Zwahlen F. (2002): Main concepts of the European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Journal, 10(2) : 340-345.

Desprats, J.F., Marchal, J.P., Pomares, C. and Doerfliger, N. (1998) – Voirie départementale et la protection de la ressource en eau. En cours d'édition, BRGM.

Dörfliger N. & Zwahlen F. (1998): Practical Guide, Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK). – Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL): 56 p.; Bern.

Dörfliger N., Jauffert D., Loubier S., Petit V. (2004) – Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté. Rapport final. BRGM/RP-53576-FR

Dörfliger N., Jauffret D., Petit V., Mettetal J-P., (2007): Délimitation des périmètres de protection en milieu karstique : méthodologie basée sur la structure et le fonctionnement des systèmes karstiques ainsi que sur la cartographie multicritère de la

vulnérabilité. Exemples d'application en Franche Comté. *European Journal of water quality*, tome 38, fasc. 1, 2007

Dörfliger N., Jeannin.P.Y., Zwahlen.F. (1999) Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)., *Environmental Geology*, Vol. 39, n° 2, p. 165-176

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.

DRAF Picardie (2007) - Zonage de la vulnérabilité des masses d'eau de la région Picardie à la pollution des eaux par les produits phytosanitaires, rapport ISL et CALLIGEE

DRASS / DIREN Poitou-Charentes (2001) – Identification des bassins d'alimentation des ressources en eau prioritaires et vulnérables aux pollutions diffuses mobilisées au titre de l'adduction d'eau dans la région Poitou-Charentes, rapport ANTEA A23236C, mai 2001

Eastman, J.R., Kyem, P.A.K. and Toledano, J. (1993) – A Procedure for multi-objective decision making in GIS under conditions of conflicting objectives. *EGIS'93*. 438-447.

European Water Directive (2000): Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.

Foster S.S.D (1987): Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy – In: Van Duijvenboden, W. & VAN WAEGENING, H.G. (eds) *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*, TNO Committee on Hydrogeological Research, Proceedings and Information, 38: 69-86; The Hague.

Foster, Adams (1992) - Land-Surface Zoning for Groundwater Protection *Journal of the Institution of Water and Environmental Management IJWMEZ*, Vol. 6, No. 3, p 312-320,

Fournier M. (2006): Identification des modalités de transport et de la vulnérabilité du karst de la craie. Application de nouveaux outils statistiques d'analyse des données au système du Hannetot (Seine-Maritime, France), thèse, Université de Rouen, déc. 2006, 232 pp.

Ghyselinck M., Chery L. (2004) – Etude préalable à l'établissement des périmètres de protection du captage. Datation des écoulements souterrains de la source de Font d'Armoine. (commune de Belfort du Quercy), rapport BRGM/RP-53285-FR

Gogu, R. and Dassargues, A. (1998) – Sensitivity analysis for the EPIK vulnerability assessment in a local karstic aquifer. *Workshop : Vulnérabilité et protection des eaux karstiques*. Neuchâtel (Suisse).

Gogu, R.C. and Dassargues, A. (2000) – Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, **39**(6), 549-559.

Goldscheider N., Klute M., Sturm S. & Hötzl H. (2000): The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. – *Z. angew. Geol.*, 46 (2000) 3: 157-166; Hannover.

Goldscheider, N. (2002): Hydrogeology and vulnerability of karst systems – examples from the Northern Alps and Swabian Alb.- Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften, 236 S.; <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/2002/bio-geo/3/3.pdf>

GRAPPE Lorraine (2006) - Cartographie du potentiel de contamination des eaux par les produits phytosanitaires, 62 p.

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

Grubb (1993). Analytical model for estimation of steady-state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers, *Ground Water*, vol. 31, n° 1, p. 27-32

Gutierrez A. (1994) – Evaluation des ressources en eau souterraine de l'île de Malte, thèse de l'université Pierre et Marie Curie, 320 p.

Gutierrez A., Rabier C. (2003) – Détermination du bassin d'alimentation des captages du SIPTEC aux calcaires de Touraine, rapport BRGM/RP-52501-FR

Haitjema, H.M. (1995). *Analytic Element Modeling of Groundwater Flow*. Academic Press, Inc.,

Hölting B., Haertle T., Hohberger K-H., Nachtigall K.H., Villinger E., Weinzierl W. & Wrobel J-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – *Geol. Jb.*, C63: 5-24; Hannover.
Hydrogeology, 3 : 17-23.

Invernon P. (2005) – Protection des captages d'eau potable contre les pollutions diffuses : contribution à l'élaboration du 9eme programme d'intervention de Agence de l'eau Rhône – Méditerranée et Corse, rapport de DESS Hydrogéologie et Environnement, Université d'Avignon des Pays de Vaucluse

Isaak EH (1989) *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561 pp

Jauffret, D., Desprats, J.F., Izac J.L., Nay K.M. (2001a) – Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région Bourgogne à l'échelle du 1/100 000, rapport BRGM/RP-50908-FR

Jauffret, D., Desprats, Martelat A., Garnier J.N., Joannon G., Grenier S., Paput M.C., Creuzot G., Viprey F. (2001b) – Cartographie préliminaire à la mise en place du réseau de suivi des produits phytosanitaires dans les eaux en région Bourgogne, rapport BRGM/RP-50571-FR, 123 p.

Jeannin P-Y., Cornaton F., Zwhalen F. & Perrochet P. (2001): VULK: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation. – 7th Conference on Limestone Hydrology and

Fissured Media, Besançon 20– 22 Sep. 2001, Sci. Tech. Envir., Mém. H . S., 13: 185-190.

Khouri, J. and Miller, J.C. (1994) -. Groundwater vulnerability in areas of climatic extremes. In: J. Vrba and A. Zaporozec (Editors), Guidebook on mapping Groundwater vulnerability. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 49-56.

Király L. (1969) – Statistical analyses of fractures (orientation and density). *Geol Runschau*, **59**, 125-151.

Laborde J.P. (2000) – Eléments d'hydrologie de surface, Univ. De Nice Sophia-Antipolis, 191 p. <http://www.khayma.com/hydraulique/Cours%20HydrologieJPL.pdf>

Lachassagne P. & Wyns R., (2005) – Aquifères de socle : nouveaux concepts. Application à la prospection et à la gestion de la ressource en eau, Géosciences, N°2 septembre 2005, BRGM.

Lachassagne P., Wyns R., Bérard P., Bruel Th., Chery L., Coutand Th., Desprats J.F., Le Strat P. (2001).- Exploitation of high yields in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones.- *Ground Water*, Vol. 39, N°4, July-August 2001, pp. 568-581.

Lallemand-Barrès, A., Roux, J.C. (1999) Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine, guide méthodologique et réglementaire, 2^e édition, Manuels et Méthodes 33, Editions BRGM.

Lobo-Ferreira J P and Cabral M. 1991, Proposal for an operational definition of vulnerability for the European community's atlas of groundwater resources, In *Meeting of the European Institute for Water*, [Groundwater Work Group, Brussels, February 1991],

Lobo-Ferreira J P. 1999 : The European Union experience on groundwater vulnerability assessment and mapping *Coastin* 1: 8–1

Lodwick, W.A., Monson, W. and Svoboda, L. (1990) – Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. *International Journal of Geographical Information Systems*, **4**(4), 413-428.

Mangin A. (1971) – Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique, *Annales de spéléologie*, t 26, 2, p. 283-329

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

Mangin, A. (1996) – Structure et fonctionnement des aquifères karstiques, les concepts et les approches. *Séminaire national : Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique*. Montpellier, France. 102-121.

Mardhel V., Gravier A. (2005) - Carte de vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP-54148-FR

Maréchal, J.-C.; Dewandel, B.; Subrahmanyam, K., (2005) - Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research* 2005, 40, (11), 17.

Margane A. (2003) - Guideline for Groundwater Vulnerability Mapping and Risk Assessment for the Susceptibility of Groundwater Resources to Contamination, Technical cooperation, Project N° 1996.2189.7, ACSAD-BGR, 177p.

Margat, J. (1968) : Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. – BRGM-Publication 68 SGL 198 HYD ; Orléans

Margat, J. and Suais-Parascandola, M.F. (1987) -. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution, some lessons from experience in France. *In*: W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegeningh (Editors), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, The Hague, pp. 433-436.

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.

Martin.J.C. (2005) – Vulnérabilité intrinsèque des aquifères et des zones humides de la région Centre. Note de synthèse. Rapport BRGM/RP-54299-FR

Napolitano, P. And Fabbri, A.G. (1996) -. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS, HydroGIS 96 : application of Geographic Information Systems in Hydrologie and Water Resources Management. IAHS Publ., pp. 559-566.

Neukum Ch., & Hötzl H., (2007) : Standardization of vulnerability maps, Environmental Geology (2007) 51 : 689-694.

Nicoud G, Maillet-Guy G (1988) – Hydrogéologie des dispositifs détritiques quaternaires graveleux de l'avant-pays alpin. Geologie Alpine, Memorie, HS, vol.14, pp.291-298.

OFEFP (1998). – Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (méthode EPIK). L'environnement pratique, Guide pratique.

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

OFEFP, OFEG (2004) - 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.

Palmer A.N. (1991) – Origin and morphology of limestone caves, *Geological Society of America Bulletin*, **103**, 1-21.

Palmquist, R. (1991) Hedonic Methods. In Braden, J. and Kolstad, C. (Eds.) Measuring the Demand for Environmental Quality Amsterdam: Elsevier.

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., Bakalowicz M., Fontaine L., Dörfli N. (2006) : Cartographie de la Vulnérabilité des Karsts Evolution de la méthode RISKE. Congrès *Les Ressources en eau en région karstique – Rouen 5- 6 mai 2006*.

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-protoc/index.htm>

Ricour J. (1988) – Elaboration de cartes de vulnérabilité et de sensibilité du milieu souterrain dans le cadre d'une application à la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais), note technique BRGM 88NPC101.

Rodet J. (1993) : Le rôle des formations quaternaires dans le drainage karstique : l'exemple des craies du bassin de Paris. *Quaternaire*, 4 (2-3) : 97-102.

Rock G., Kupfersberger H. (2002) – Numerical delineation of transient capture zones, *Journal of Hydrology*, n° 269, p.134-149.

Rouxel E., Baran N. (2004) - Détermination de la vitesse de transfert des nitrates en zone non saturée crayeuse. Phase 1 : Identification des différents contextes hydrogéologiques, rapport BRGM/RP-53357-FR,

Saaty, T.L. (1977) – A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, **15**,234-281.

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>

Seguin J.J. (2001) Principes de résolution et solutions analytiques de quelques problèmes simples d'écoulements et de transport de masse en milieux poreux saturés et non saturés, document interne BRGM

Suais, M.F., Vinatier, J.M. and Barat, A. (1990) – Vulnérabilité des aquifères, recherche de critères cartographiques pertinents. Essai de cartographie automatique sur la plaine alluviale entre Rhône et Ain (01). R 30890 RHA 4S 90, BRGM.

Thiery.D., Golaz.C., Gutierrez.A., Fialkiewicz.W., Darsy.C., Mouvet.C., Dubus.I.G. (2004) Refinements to the Marthe model to enable the simulation of the fate of agricultural contaminants from the soil surface to and in groundwater, in COST International Workshop - Rome - Italy - 5-7/05/2004, pp. 315-320

US EPA (1987) – Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas. US EPA/440/6-87/010 report, 212 p.

US EPA (1991) - Delineation of wellhead protection areas in fractured-rock aquifers., EPA 570/9-91-009 report, 144 p.

US EPA (1993) - PRZM-2, A model for Predicting Pesticide Fate in the Crop Root and Unsaturated Soil Zones: User Manual for Release 2.0, US Environmental Protection Agency, EP 600/R-93/045, 406p.

US EPA (1994) – Handbook Groundwater and Wellhead Protection, US EPA/625/R-94/001 report, 269 p.

US EPA (1998) – Literature review of methods for delineating wellhead protection areas. Report EPA, United States Environmental Protection Agency, Office of water, Office of ground water and drinking water, No. 816-R-98-021, 36 p.

van Duijvenbooden W and van Waegeningh H G. (1987), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants In *Proceedings and Information No. 38 of the International Conference* [Organized by the TNO Committee on Hydrological, Research, Delft, the Netherlands, 1987]

van Stempvoort D., Evert L. and Wassenaar I., (1993) - Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, **18**, 25-37.

Vassolo, S., W. Kinzelbach et W. Schäfer. (1998). Determination of a well head protection zone by stochastic inverse modelling. *Journal of Hydrology*, 206 (3/4), 268-280.

Pennequin D., Vernoux, J.F., Saout C., Château G., Pillebout A. (2007) - Protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine, *Géosciences n°5*, BRGM, 88-99

Vias JM., Andreo B., Perles M.J., Carrasco F., Vadillo I. & Jimenez P. (2002): Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. In: *Karst and Environment* (F. Carrasco, J.J. Durán and B. Andreo, Eds.), 75-83.

Vierhuff H., W. Wager and H. Aust, (1981). Die Grundwasservorkommen in der Bundesrepublik Deutschland. *Geologisches Jahrbuch, Band C30*, 3-110.

Villumsen A., Jacobsen O.S., Sondershov, C. (1983) : Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regards to surface pollution, *Geological Survey of Denmark, Yearbook 1982, Copenhagen*, pp 17-38.

Vrba J. & Zaporozec, A. [eds.] (1994): *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. – International Contributions to Hydrogeology (IAH), 16: 131 p.; Hannover.

Vrba, J. and Civita, M. (1994) -. Assessment of groundwater vulnerability. In: J. Vrba and A. Zaporozec (Editors), *Guidebook on mapping Groundwater vulnerability*. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 31-48.

Zaporozec, A. (1994) -. Concept of groundwater vulnerability. In: J. Vrba and A.

Zaporozec (Editors), Guidebook on mapping Groundwater vulnerability. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 3-7.

Zaporozec, A. and Vrba, J. (1994) -. Classification and review of groundwater and vulnerability maps. *In*: J. Vrba and A. Zaporozec (Editors), Guidebook on mapping Groundwater vulnerability. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 21-19.

Zwahlen F. (Chairman, Editor in Chief) (2003) COST Action 620, Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers Final Report

Annexe 1

Travaux de l'office de l'environnement helvétique sur le dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les pollutions chimiques persistants

Méthodologie générale

L'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) est en Suisse le service fédéral compétent en matière d'environnement.

La notion d'aire d'alimentation des eaux souterraines Zu a été introduite dans la législation suisse lorsque l'ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux est entrée en vigueur. L'aire d'alimentation fait partie des mesures prises sur le plan de l'organisation du territoire pour protéger les eaux souterraines. Elle est utilisée de manière ciblée pour lutter contre la pollution ou la mise en danger des eaux souterraines par des substances polluantes mobiles qui ne sont pas dégradables ou ne le sont que difficilement, telles que les nitrates ou les produits phytosanitaires.

L'OFEFP (Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage) qui a récemment été intégré à l'OFEV a publié un guide sur le dimensionnement des aires d'alimentation Zu (Parriaux et Bussard, 2002) basé sur les travaux de thèse de T. Bussard (2005). Ce dernier a mis au point une méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants. Cette méthodologie découle du fait que le transport des polluants persistants, considérés comme mobiles et solubles dans l'eau, est essentiellement contrôlé par les circulations des eaux. L'aptitude des sols à permettre l'infiltration des eaux en profondeur (I), la présence d'exportation au sein de la zone non saturée Etats-Unis – drainage agricole ou nappe perchée – et la circulation de l'eau, en zone saturée, en direction du captage (P) sont les principaux paramètres qui régissent le cheminement de l'eau depuis la surface du bassin d'alimentation jusqu'au captage. L'illustration 60 montre le cas d'un puits de pompage ; le cas d'une source est similaire. La méthode proposée consiste à protéger prioritairement les zones qui contribuent le plus à l'alimentation du captage.

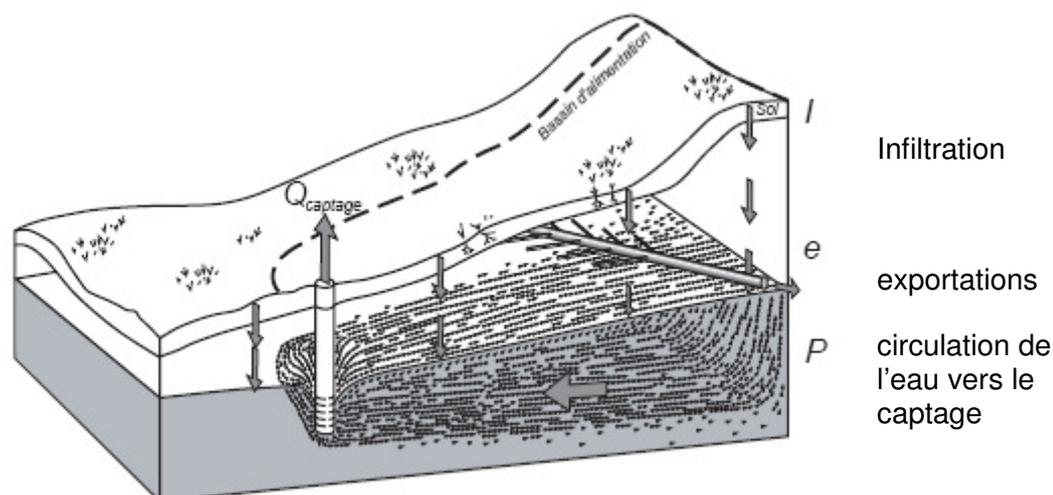


Illustration 60 – Paramètres régissant le cheminement de l'eau depuis la surface du bassin d'alimentation jusqu'au captage (in Bussard, 2005)

Le guide pratique de l'OFEFP démontre très clairement que l'on ne peut dimensionner l'aire d'alimentation au moyen d'une méthode hydrogéologique précise, mais qu'il faut recourir à une combinaison de méthodes. Les différentes procédures doivent se dérouler tantôt en parallèle, tantôt par étapes. L'étude se consacre également à la complexité des processus qui contribuent en fin de compte à alimenter un captage. Elle décrit plusieurs approches de modèles conceptuels.

La méthodologie définie par Bussard (2005) se décline en 6 étapes (Illustration 61) :

- 1 – Identifier la portion d'aquifère alimentant le captage.
- 2 – Définir, à la surface du terrain, le bassin d'alimentation du captage.
- 3 – Quantifier les processus de recharge et d'exportation au sein de la zone non saturée.
- 4 – Calculer la contribution à l'alimentation en eau du captage en tout point du bassin d'alimentation
- 5 – Contrôler les résultats (bilans hydrauliques et chimiques). Lorsque les résultats ne sont pas satisfaisants, les étapes doivent être réitérées.
- 6 – Dimensionner les zones de protection (les secteurs de plus grande valeur $C = I(1 - e)P$ seront protégés prioritairement).

L'intérêt de cette approche est de ne pas prendre en compte la totalité du bassin d'alimentation comme zone de protection contre les polluants persistants mais de définir une zone de protection plus petite en sélectionnant uniquement les surfaces les plus contributives. Cette approche est uniquement basée sur le cheminement de l'eau,

depuis la surface du bassin d'alimentation jusqu'au captage. Les secteurs de plus forte contribution à l'alimentation du captage Etats-Unis [m/s] sont à protéger prioritairement. Le concept a essentiellement été défini pour lutter contre les contaminations diffuses. Il s'applique à la majorité des situations hydrogéologiques, que ce soit un aquifère en roches meubles, en roches fissurées ou karstique.

Cette méthode semble bien adaptée à la problématique de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. En combinant les zones les plus contributives et les zones les plus vulnérables, on peut définir les zones plus sensibles en terme de risque de pollution et donc les zones où des actions de prévention sont les plus efficaces (Illustration 62).

Considérer l'ensemble du bassin d'alimentation conduirait à des mesures coûteuses et peu efficaces. Plutôt que de disperser les moyens financiers mis en œuvre pour la protection de la ressource sur l'ensemble du bassin d'alimentation, il apparaît préférable de les concentrer sur des zones cibles où les actions seront les plus efficaces. La méthode présentée conduit à déterminer les zones où agir de manière ciblée.

La méthode de Bussard est basée sur une décomposition du cheminement de l'eau en trois parties :

- le trajet au travers du sol (paramètre d'infiltration I [m/s]),
- le cheminement depuis la sortie de la zone d'enracinement jusqu'à la nappe principale, au sein de la zone non-saturée (paramètre d'exportation e [-])
- le parcours au sein de la zone saturée de la nappe principale, en direction du captage (paramètre P [-]).

Nous allons détailler dans la suite de ce chapitre les différentes étapes de la méthodologie. Les deux premières portent sur la provenance des écoulements qui alimentent le captage ; la démarche part du captage puis est élargie, en amont, jusqu'à la totalité du bassin d'alimentation. Les étapes suivantes abordent les aspects quantitatifs.

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

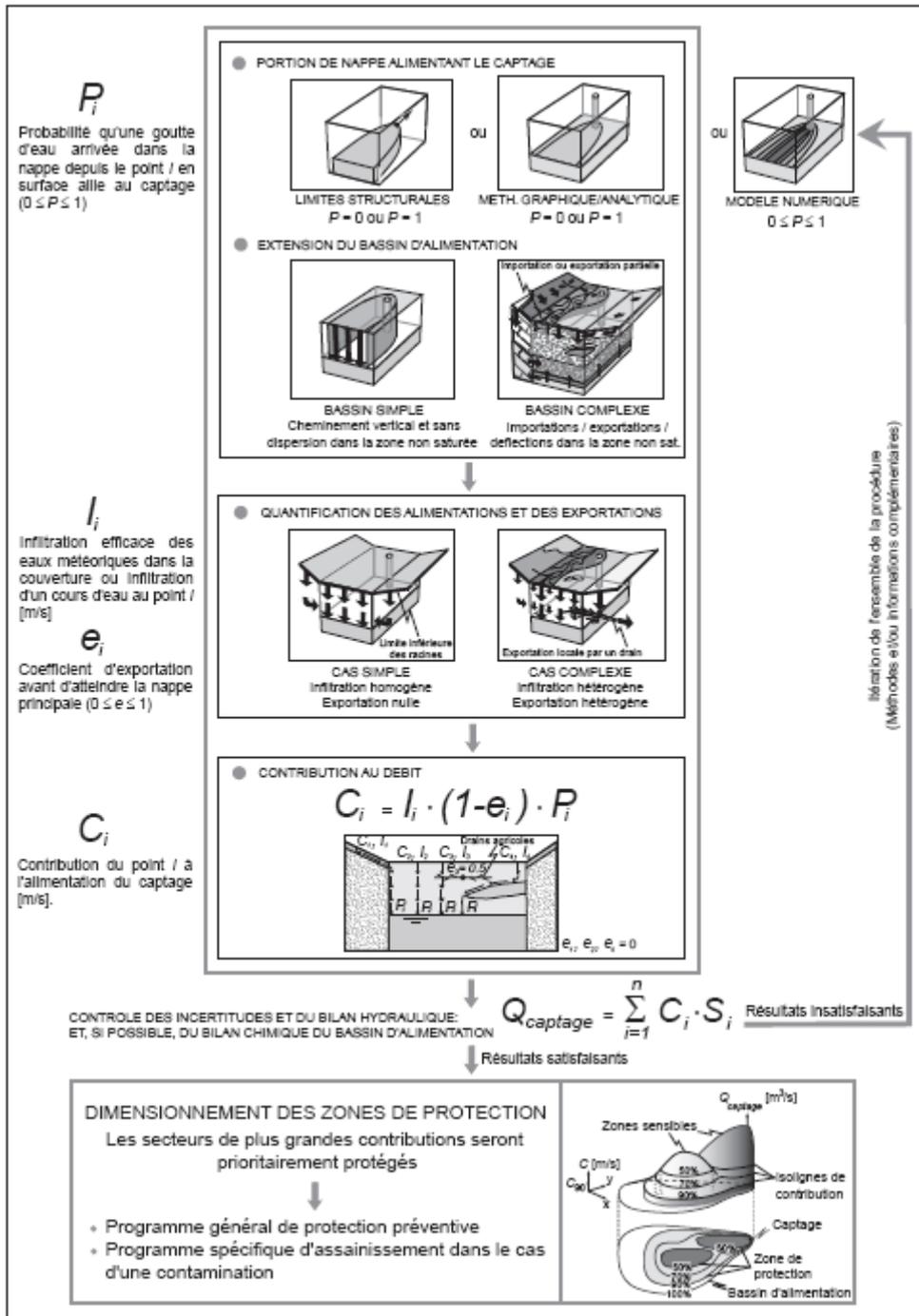
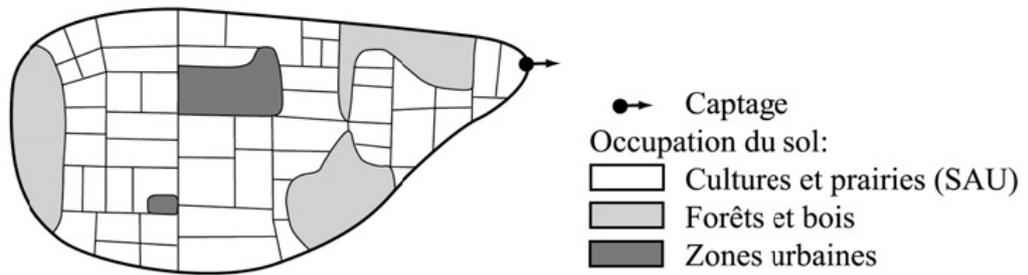
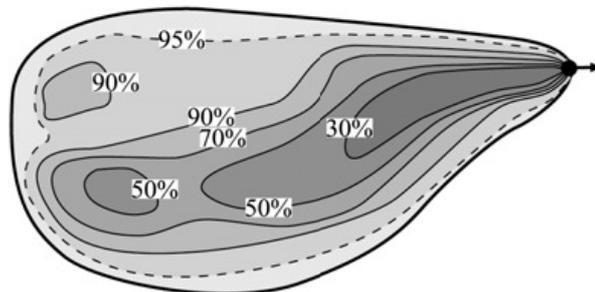


Illustration 61 – Méthodologie pour le dimensionnement de zone de protection des eaux souterraines contre les polluants persistants (in Bussard, 2005)

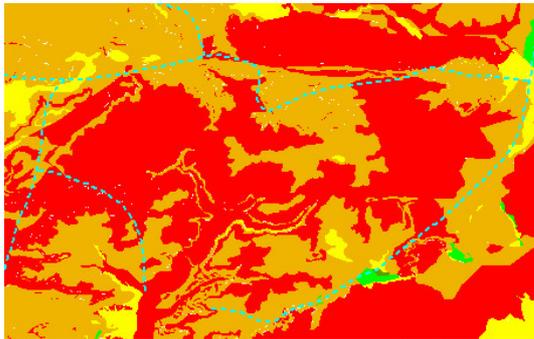
Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie



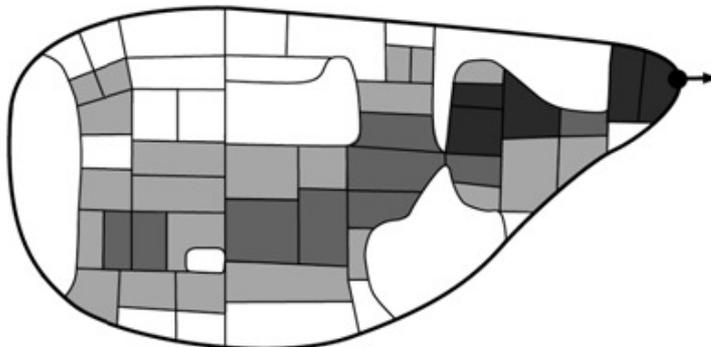
Bassin d'alimentation du captage considéré



Champ de contribution à l'alimentation en eau du captage



Vulnérabilité intrinsèque



Zones sensibles

Illustration 62 – Méthodologie générale pour définir des secteurs où des actions de prévention sont souhaitables (adapté de Bussard, 2005)

Etape 1 : Délimitation de la portion de nappe alimentant le captage

Les méthodes de délimitation de la portion de nappe qui alimente le captage tendent à répondre à la question : une particule d'eau située en un endroit quelconque de la zone saturée de l'aquifère terminera-t-elle sa course dans le captage ? Il s'agit donc de calculer le champ P qui indique en tout point de la nappe la probabilité qu'une particule d'eau rejoigne ce captage.

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des limitations, ces dernières étant principalement liées à des hypothèses simplificatrices sur la structure et le fonctionnement de l'aquifère.

D'une manière générale, la portion de la nappe qui alimente le captage dépend de critères structuraux et hydrodynamiques et dans certains cas du débit de pompage. Ainsi, selon le type d'aquifère, l'un ou l'autre de ces critères peut prédominer, et on aura recours à des méthodes différentes pour délimiter la portion qui alimente le captage. :

- Méthode des limites structurales
- Méthode hydrodynamique graphique
- Méthodes analytiques
- Modèles numériques

La **méthode des limites structurales** fait l'hypothèse que les limites supposées sont imperméables et que toutes les eaux de l'aquifère ainsi délimité rejoindront le captage, ce qui est commode mais ne permet pas de tracer la portion d'aquifère qui alimente un captage donné lorsque l'aquifère a plusieurs exutoires. Cette méthode est bien adaptée, en première approche, aux sources à l'exutoire d'un bassin versant hydrogéologique dont on ne connaît pas la piézométrie et aux captages alimentés par un aquifère à porosité de fractures ou karstique.

La **méthode hydrodynamique graphique** est basée sur un tracé de la surface piézométrique. Elle n'est valable que dans les cas où la conductivité hydraulique (perméabilité) est isotrope, ce qui est le cas des aquifères poreux mais rarement celui des aquifères fissurés et encore moins karstiques. Dans les aquifères en roches fissurées, l'anisotropie dépend de l'orientation et du nombre de réseaux de fissures. Si le milieu comporte de nombreux réseaux qui couvrent la majorité des directions, la conductivité peut être considérée à grande échelle comme isotrope. En revanche, s'il ne contient que quelques réseaux ou s'ils suivent tous une ou des directions préférentielles, elle sera anisotrope. Il est donc nécessaire d'étudier l'agencement structural des discontinuités du massif. Dans les aquifères karstiques, la conductivité hydraulique est d'une manière générale anisotrope, car les écoulements suivent principalement le réseau karstique qui est anisotrope.

La méthode est, par conséquent, bien adaptée aux captages en domaine alluvial et sédimentaire non karstique (Illustration 63). Mais il est souvent difficile de déterminer graphiquement leur zone d'appel, à moins de disposer de nombreux piézomètres à

proximité du captage, ce qui reste assez rare. Il est donc souvent utile de compléter la méthode graphique par la méthode analytique pour les abords du captage.

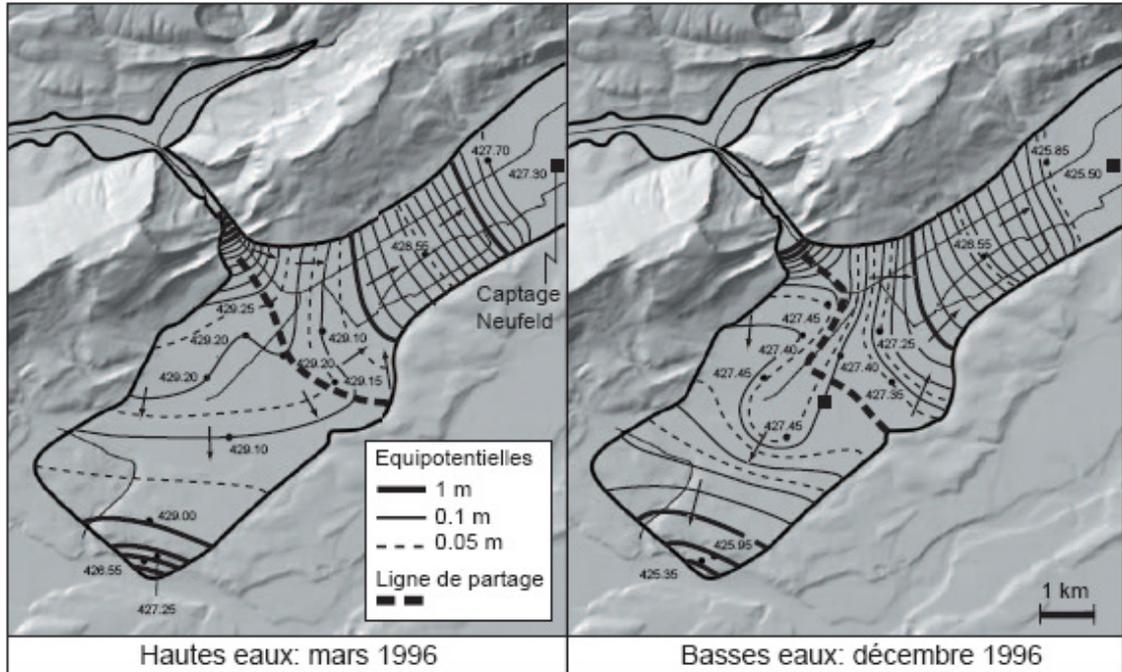


Illustration 63 – Exemple d'application de la méthode graphique en domaine alluvial par détermination de la ligne de partage des eaux (in Bussard, 2005)

Les **méthodes analytiques** étant développées dans un chapitre spécifique, nous ne reprendrons ici que l'exemple illustrant la combinaison d'une méthode analytique et de la méthode graphique. La méthode utilisée est celle de Bear et Jacob (1965)

En nappe captive:

$$x_L = \frac{Q}{2\pi \cdot b \cdot K \cdot i}$$

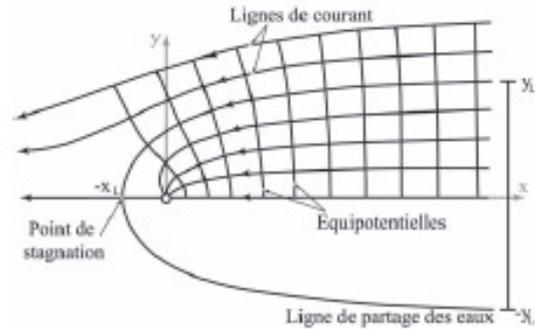
$$y_L = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot K \cdot i}$$

En nappe libre:

$$x_L = \frac{Q \cdot L}{\pi K \cdot (h_1^2 - h_2^2)}$$

$$y_L = \frac{Q \cdot L}{K \cdot (h_1^2 - h_2^2)}$$

(7)



Q : débit du puits [m³/s].

b : épaisseur de la tranche d'eau de l'aquifère [m].

K : conductivité hydraulique de l'aquifère saturé [m/s].

i : gradient hydraulique de la nappe: $i = (h_1 - h_2)/L$ [-].

h_1 et h_2 : charges hydrauliques amont et aval le long d'une ligne de courant avant la mise en pompage [m]. Ces charges ne sont pas mesurées à partir d'un repère géodésique, mais à partir du fond imperméable, supposé horizontal, de l'aquifère; ainsi $b = (h_1 + h_2)/2$.

L : distance horizontale entre ces points [m].

Illustration 64 – Utilisation de la méthode de Bear et Jacob (1965) pour la délimitation de l'aire d'alimentation d'un captage (in Bussard, 2005)

L'illustration 65 montre le résultat du calcul pour deux valeurs de débit (300 m³/h et 55 m³/h)

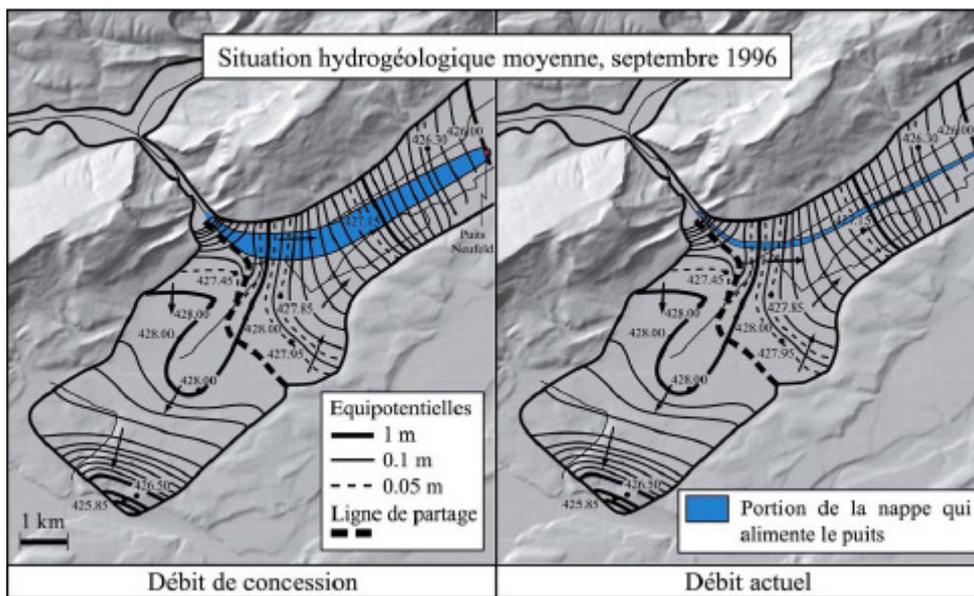


Illustration 65 – Approximation de la portion de la nappe qui alimente le puits Neufeld (SO) par combinaison des méthodes analytiques et graphiques, en considérant une situation hydrogéologique moyenne (in Bussard, 2005)

En raison des limitations des méthodes analytiques (milieu poreux homogène, isotrope et sans conditions aux limites détectables), l'utilisation des **modèles numériques** est de plus en plus répandue. Ils permettent en particulier de prendre en compte les hétérogénéités de l'aquifères (distributions de perméabilités, présence de cheneaux, failles, ...). Ils seront également détaillés dans un chapitre spécifique.

Avec l'utilisation de modèles numériques, il existe deux approches pour déterminer la portion de la nappe qui alimente un captage :

- Les méthodes advectives (convectives) qui ne tiennent compte que des flux hydrauliques et produisent un champ binaire de la probabilité P avec une zone de la nappe d'où une particule est censée rejoindre à coup sûr le captage ($P = 1$) et une zone d'où les particules ne peuvent pas le rejoindre ($P = 0$).
- Les méthodes advectives/dispersives, qui tiennent compte aussi de la dispersion et produisent un champ continu de P .

La délimitation de la portion de la nappe qui alimente le captage peut être assez différente selon la méthode employée (Illustration 66).

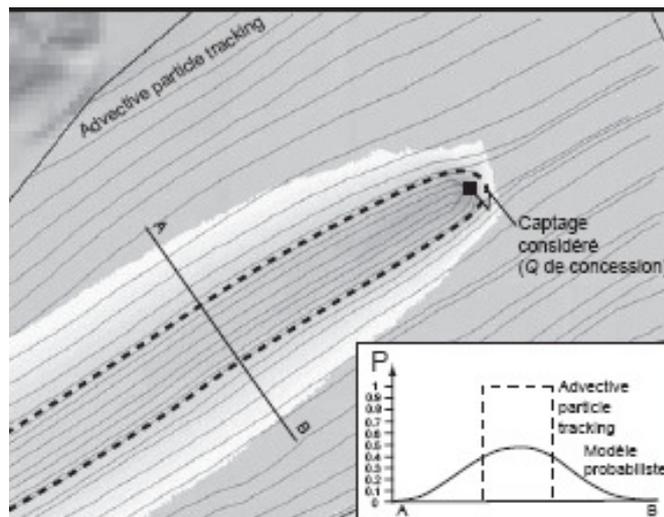


Illustration 66 – Détermination de la portion de nappe qui alimente un captage par une méthode advective et par une méthode advective/dispersive

Etape 2 : délimitation de l'extension du bassin d'alimentation

Il s'agit d'élargir le secteur d'étude de façon à définir l'extension du bassin d'alimentation du captage, c'est-à-dire la portion de territoire qui participe à l'alimentation du captage. Pour cela, il est nécessaire d'établir un modèle conceptuel du cheminement de l'eau en surface et dans le sous-sol.

Dans les cas simples, les écoulements peuvent être uniquement verticaux dans la zone non saturée. Cependant, il est fréquent que le bassin soit plus complexe et qu'il comporte des importations et des exportations latérales (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Le modèle conceptuel permet en outre d'apprécier l'hétérogénéité de la contribution à l'alimentation du captage.

La délimitation du bassin d'alimentation peut être vérifiée par son bilan hydraulique qui doit être nul (les entrées sont égales aux sorties).

Entrées

1 – Infiltration efficace des eaux météoriques dans la couverture (I_e).

2 – Infiltration d'eaux d'irrigation

3 – Infiltration des cours d'eau (I_r)

4 – Infiltration artificielle des eaux claires urbaines (toits, places, chemins d'accès).

5 – Perte de canalisations (eaux potables, claires ou usées).

6 – Installation de réalimentation artificielle.

7 – Apport par des écoulements latéraux de subsurface (ou écoulements hypodermiques) qui atteignent l'aquifère principal.

8 – Apport par d'autres aquifères

Sorties

9 – Les écoulements de subsurface

10 – Les drainages : si les eaux drainées ne se réinfiltrent pas en aval, elles sont extraites du système.

11 – Les sources et autres exutoires naturels de la nappe. Selon le contexte, la nappe peut s'exfiltrer dans les cours d'eau.

12 – Les puits de pompage.

13 – Les pertes dans d'autres aquifères.

La surface du bassin d'alimentation peut être vérifiée par le calcul simplifié suivant :

$$Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{sortie}}$$

$$SBA \cdot I_e + Q_{\text{rivières}} = Q_{\text{captage}} + Q_{\text{exutoires}}$$

Avec

- SBA : surface du bassin d'alimentation [m²].

- I_e : infiltration efficace moyenne des eaux météoriques dans la couverture [m/s].

- $Q_{\text{rivières}}$: infiltration moyenne des cours d'eau dans le bassin d'alimentation du captage [m³/s].

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

- Q_{captage} : débit moyen du captage considéré [m³/s].

- Q_{exutoires} : débit moyen des écoulements qui sortent du bassin d'alimentation du captage par un autre exutoire que le captage considéré (p. ex. par d'autres captages du bassin, par les écoulements non captés, etc.) [m³/s].

Les illustrations suivantes présentent des exemples de bassin d'alimentation de captage selon différentes configurations hydrogéologiques.

Pour les **aquifères alluviaux**, une étude détaillée permet généralement de définir quel est le secteur (ou les secteurs) qui produit la majeure partie de l'alimentation du puits. Ce secteur a souvent une petite extension par rapport à la taille du bassin d'alimentation (cf. Illustration 67). Par ailleurs, il peut exister un transfert entre les cours d'eau et la nappe qui induit une hétérogénéité de la contribution à l'alimentation du captage.

Dans les **aquifères karstiques**, les écoulements souterrains dépendent uniquement de critères structuraux et hydrodynamiques et sont quasi indépendants de la topographie. En surface, l'infiltration des eaux météoriques et des cours d'eau est très hétérogène, car elle dépend du développement de l'épikarst, de la couverture et de la topographie. L'extension du bassin d'alimentation du captage est en général très proche des limites de la portion de la nappe qui alimente le captage (cf. Illustration 68) mais celle-ci peut varier en fonction des conditions hydrologiques (hautes eaux et basses eaux) ; seuls des essais de traçage artificiels effectués en conditions hydrologiques contrastées au niveau de la limite supposée peut permettre de mettre cette limite en évidence.

Dans les aquifères de **socle**, la tectonique est le facteur déterminant pour la circulation des eaux. La perméabilité de fissure peut être très hétérogène et anisotrope. Le bassin d'alimentation du captage dépend ainsi essentiellement de l'agencement des fractures, de la géologie et de la topographie (Illustration 69).

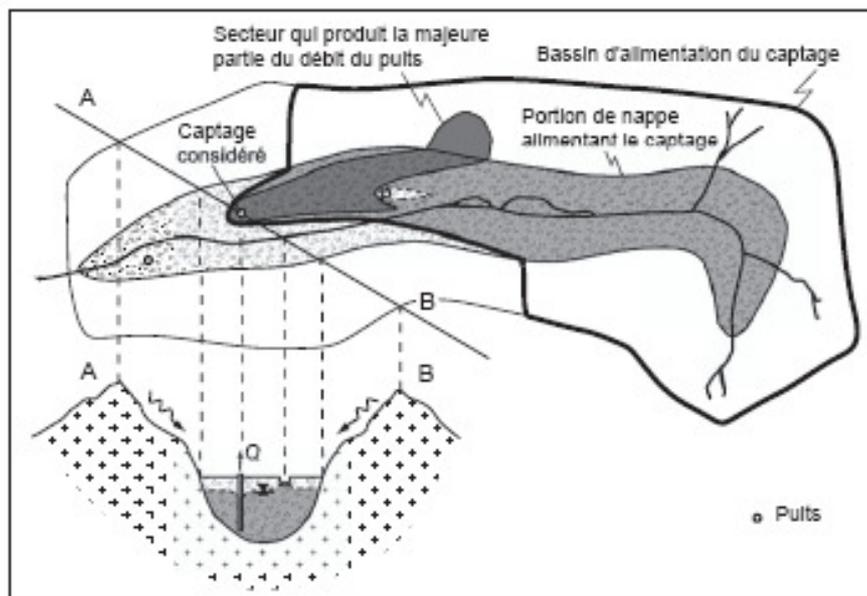


Illustration 67 – Exemple de bassin d'alimentation d'un captage dans un aquifère alluvial (in Bussard, 2005)

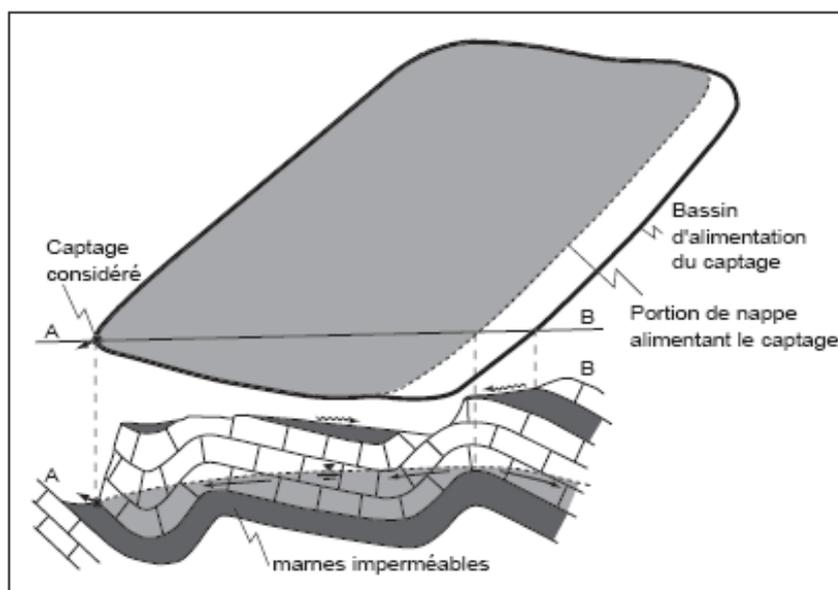


Illustration 68 – Exemple de bassin d'alimentation d'un captage dans un aquifère karstique (in Bussard, 2005)

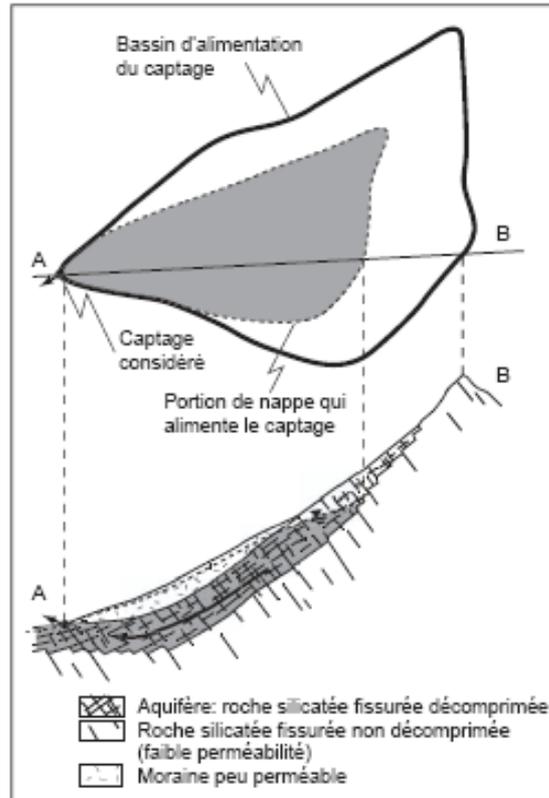


Illustration 69 – Exemple de bassin d'alimentation d'un captage dans un aquifère de socle (in Bussard, 2005)

Etape 3 : Quantification des processus d'alimentation et d'exportation au sein de la zone non saturée

Il s'agit de quantifier l'alimentation de la nappe. Pour cela, il est nécessaire de :

a) Quantifier la répartition spatiale de l'infiltration efficace des eaux météoriques dans la couverture (I_e) et l'infiltration des cours d'eau (I_r). La somme de ces deux types d'infiltration est désignée par I [m/s]. Selon l'hétérogénéité des sols, la taille du bassin d'alimentation et les relations cours d'eau/aquifère, I sera considérée comme homogène ou hétérogène.

b) Quantifier la répartition des exportations Etats-Unis [-] des eaux infiltrées avant qu'elles atteignent la nappe principale ($0 \leq e \leq 1$). Des drains agricoles ou des écoulements de nappes perchées peuvent diminuer le flux hydraulique provenant de la surface.

a) Infiltration

L'infiltration efficace annuelle moyenne à la surface du bassin d'alimentation d'un captage peut être homogène ou hétérogène. Il s'agit donc, en premier lieu, de reconnaître s'il existe une hétérogénéité de l'infiltration efficace et si c'est le cas, de classer les différents secteurs du bassin d'alimentation en sous-domaines d'infiltration efficace homogène en fonction du climat, de la topographie, de l'occupation du sol et des caractéristiques du sol et du sous-sol. Ceci permet de découper le bassin d'alimentation en cellules d'infiltration efficace homogène (cf. Illustration 70).

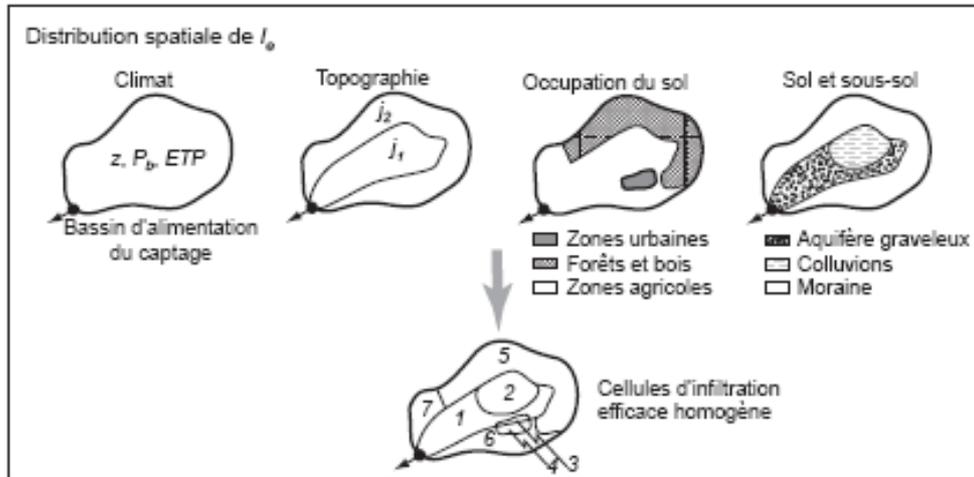


Illustration 70 – Découpage du bassin d'alimentation en cellule d'infiltration efficace homogène (in Bussard, 2005)

Pour chaque cellule, l'infiltration efficace annuelle moyenne est calculée par l'équation du bilan hydrique, si l'on suppose qu'il n'y a pas de variation de stock.

$$I_{e\ i} = P_{b\ i} - R_i - ETR_i \quad [m/s]$$

$P_{b\ i}$: 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].

Les pertes d'un cours d'eau par infiltration ou son alimentation par exfiltration de la nappe peuvent être estimées par des jaugeages en différents points du cours d'eau. L'infiltration linéaire ($I_{r\ lin}$) [m²/s] est donnée par la différence des débits (Q_i) divisée par la longueur du tronçon (l) entre les deux points de mesure.

$$I_{r\ lin\ 1} = \frac{Q_A - Q_B}{l_1} \quad (24)$$

$$I_{r\ lin\ 2} = \frac{Q_C - Q_D}{l_2}$$

L'infiltration I_r [m/s] est ensuite obtenue en divisant $I_{r\ lin}$ par la largeur du cours d'eau de façon à ce qu'elle puisse être comparée aux valeurs d'infiltration efficace des eaux météoriques dans la couverture.

- Exportations

On distingue les exportations par les drains et les exportations dues à la présence d'une lentille de faible conductivité.

Connaissant la superficie affectée par le drainage ($S_{drainage}$), il est possible de déterminer le coefficient d'exportation e [-] donné par l'équation :

$$e = \frac{Q_{drainage}}{\sum I_{ei} \cdot S_i}$$

S_i : superficie d'un secteur i d'infiltration efficace homogène (I_{ei}) contenu dans la surface drainée.

$$S_{drainage} = \sum S_i$$

La présence d'un niveau de faible conductivité hydraulique situé à proximité de la surface peut conduire à une exportation partielle (voire complète) des eaux infiltrées avant qu'elles atteignent la nappe. Pour calculer le coefficient d'exportation, il est nécessaire de connaître la nature, l'extension et la géométrie de la couche peu perméable. La présence d'un tel niveau est généralement mise en évidence par la présence de sources s'il est situé à proximité de la surface. En revanche, s'il se situe plus en profondeur, seuls des forages peuvent identifier sa présence.

Etape 4 : Calcul de la contribution à l'alimentation en eau du captage

La contribution à l'alimentation du captage est calculée en tout point i du bassin par l'équation :

$$C_i = I_i (1 - e_i) P_i \quad [\text{m/s}]$$

I_i : Infiltration efficace des précipitations ou infiltration de cours d'eau au point i [m/s].

e_i : Coefficient d'exportation des particules d'eau infiltrées avant d'atteindre la nappe principale, $0 \leq e \leq 1$ [-].

P_i : Probabilité qu'une particule d'eau arrivée dans la nappe depuis un point i en surface aille au captage, $0 \leq P \leq 1$ [-].

Les champs C , I et e sont définis en surface, contrairement au champ P , déterminé en profondeur (Illustration 71).

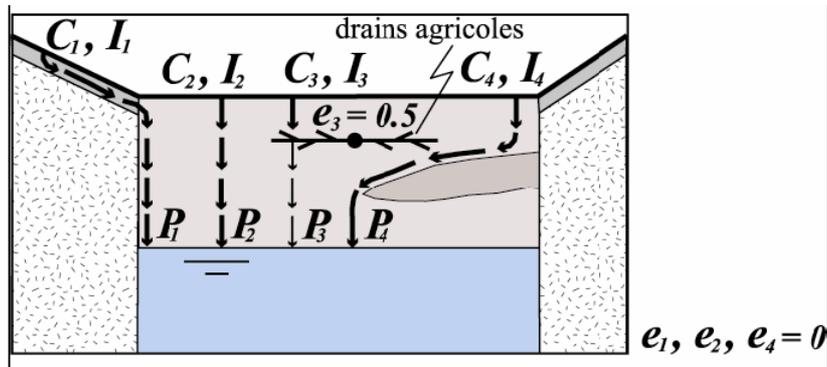


Illustration 71 – Calcul de la contribution à l'alimentation du captage en tout point du bassin d'alimentation (in Bussard, 2005)

Le résultat peut être représenté par le champ de contribution C [m/s] ou par des isolignes de C définissant des surfaces qui participent à un certain pourcentage du débit capté, en comptant à partir des plus fortes valeurs (cf. Illustration 72). Les pourcentages sont définis par comparaison entre le volume sous la surface considérée et le volume total de l'enveloppe de contribution (débit capté).

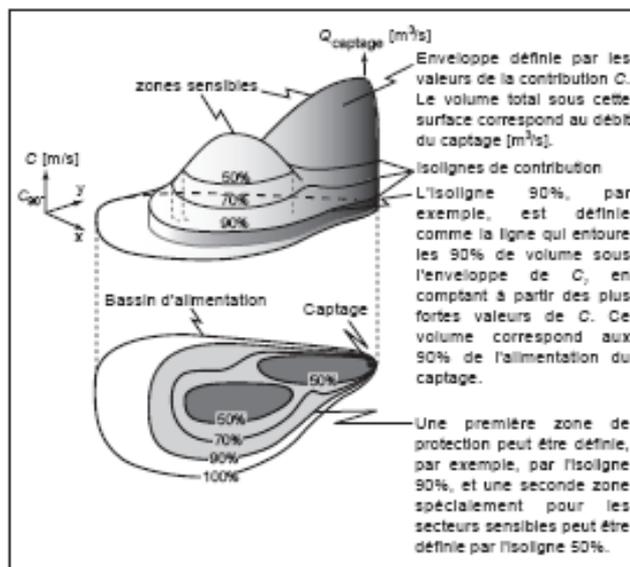


Illustration 72 – Contribution de l'alimentation en eau du captage

Etape 5 : Contrôle des résultats

A l'issue du calcul de la contribution, soit les valeurs sont jugées satisfaisantes et les zones de protection peuvent être directement dimensionnées, soit elles ne le sont pas et il est nécessaire d'itérer l'ensemble de la procédure de l'étude (étapes 1 à 4) en complétant les connaissances des écoulements par des investigations ou des traitements supplémentaires. Cette décision dépend de **l'incertitude sur les données dont on dispose et sur les flux calculés**, du **degré d'hétérogénéité de la contribution** et de l'enjeu.

Selon le type et la taille de l'aquifère, le débit capté, les données à disposition et l'enjeu économique, on pourra recourir, dans une phase itérative de la procédure, à un modèle numérique pour déterminer quelle portion de la nappe alimente le captage.

Un contrôle de base est la vérification du bilan hydraulique. La contribution totale de toute la surface du bassin d'alimentation doit correspondre au débit capté :

$$Q_{\text{captage}} = \sum_{i=1}^n C_i S_i \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Avec S_i : surface de la cellule i [m^2].

Etape 6 : Dimensionnement de la zone de protection

Sur la base de la carte des contributions, une zone de protection sera délimitée en sélectionnant prioritairement les secteurs de plus forte contribution. Des zones sensibles pourront également être définies au sein de la zone de protection (Illustration 73).

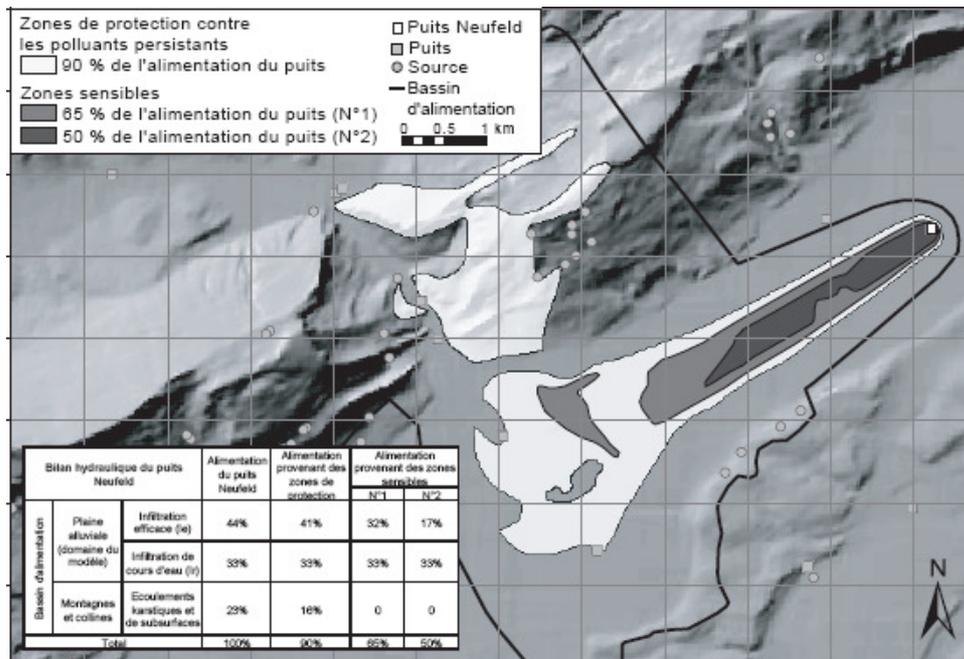


Illustration 73 – Exemple de dimensionnement des zones sensibles (in Bussard, 2005)

Exemple théorique d'application de la méthodologie

L'illustration 74 montre l'application de la méthodologie à l'aide d'un exemple théorique.

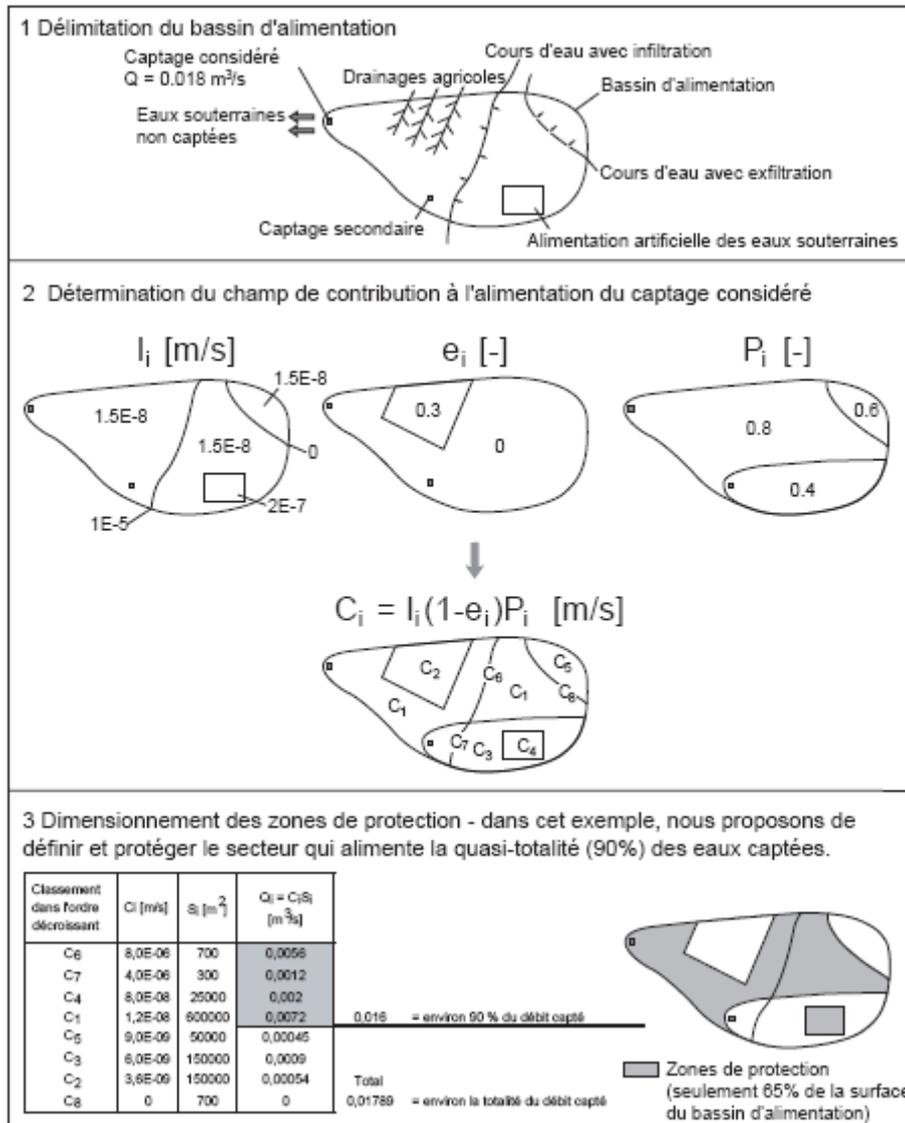


Illustration 74 – Exemple théorique de l'application de la méthodologie.(in Bussard, 2005)

Application de la méthode à un aquifère de dépôts fluvio-glaciaires

Cet exemple est également extrait de la thèse de Bussard (2005). Il est repris dans le guide de dimensionnement des aires d'alimentation Zu de l'OFEFP (2004).

L'aquifère est alimenté par l'infiltration directe des eaux météoriques sur les graviers fluvio-glaciaires, par le ruissellement et les circulations de subsurface des eaux provenant des terrains morainiques et par l'infiltration d'un cours d'eau. Il comporte deux systèmes d'exutoires concurrents, une zone de marais dans laquelle est situé le captage et un secteur plus au Sud, où les eaux souterraines de l'aquifère fluvio-glaciaire alimentent une rivière et deux autres captages.

La portion de la nappe qui alimente le captage étant principalement conditionnée par des limites structurales, elle peut être déterminée de manière binaire ($P = 1$ ou 0). Elle est délimitée au nord, à l'est et à l'ouest par l'extension structurale de l'aquifère, et au Sud par la ligne de partage des eaux entre les deux systèmes d'exutoires. Cette dernière a été tracée à partir de mesures piézométriques. La probabilité P qu'une goutte d'eau de la nappe atteigne le puits depuis les autres secteurs est considérée comme nulle.

Le champ de contribution à l'alimentation du captage est hétérogène (variété des terrains induisant une hétérogénéité de I , exportations par drainages agricoles). Une série de jaugeage a montré que l'infiltration des cours d'eau était négligeable.

Le bassin d'alimentation du puits du Morand a été divisé en cellules d'infiltration efficace homogène, en se basant sur la distribution spatiale des facteurs suivants :

- nature du sol (granulométrie, pierrosité, degré d'hydromorphie)
- épaisseur du sol
- nature du sous-sol (granulométrie, pierrosité, degré d'hydromorphie)
- conductivité hydraulique du sous-sol (essais Porchet)

L'infiltration efficace a été calculée à l'aide d'un modèle de type agronomique

L'illustration 75 montre les différents champs pris en compte pour déterminer la répartition spatiale de la contribution à l'alimentation du puits du Morand ainsi que le résultat des calculs. La contribution à 90 % de l'alimentation du captage représente 63 % de la surface du bassin d'alimentation.

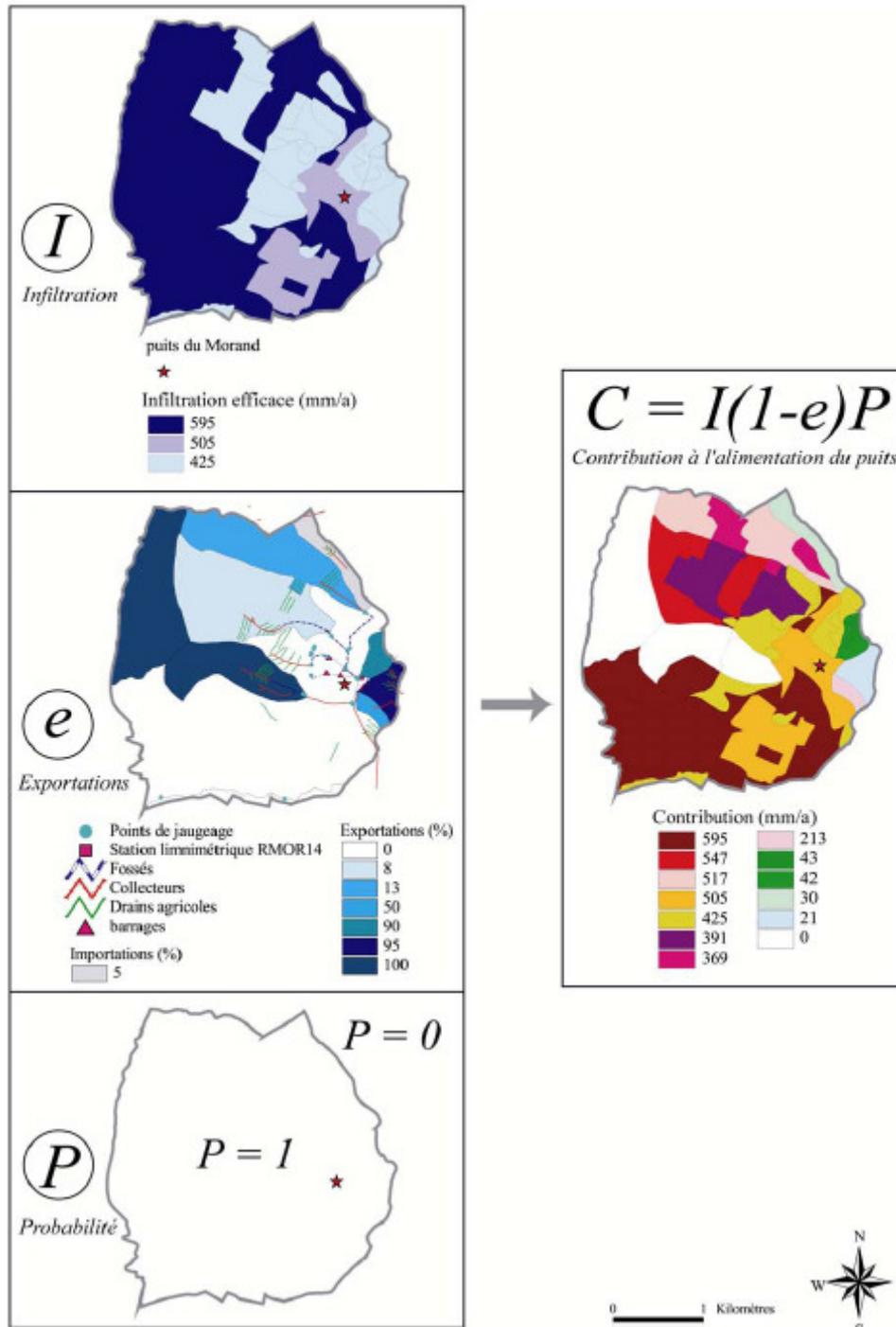


Illustration 75 – Exemple de détermination du champ de contribution à l'alimentation d'un captage (in Bussard, 2005)

Annexe 2

Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages développés au Canada

Le contexte réglementaire au Québec, à la suite de l'adoption, le 15 juin 2002, du Règlement sur le captage des eaux souterraines a rendu obligatoire la détermination de l'aire d'alimentation et des aires de protection bactériologique et virologique de tout ouvrage de captage d'eau souterraine destinée à la consommation humaine de débit moyen d'exploitation journalier supérieur à 75 m³ ainsi que la détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines captées par l'ouvrage.

Un document technique a été élaboré à ce sujet (Rasmussen et al. 2006). La méthodologie (cf. Illustration 76) consiste à délimiter une aire d'alimentation de première estimation déterminée par solution analytique et basée sur les informations disponibles. Lorsqu'il apparaît qu'en amont hydraulique du captage il n'existe aucune source potentielle de contamination, l'aire d'alimentation déterminée est jugée suffisamment sécuritaire et des dépenses supplémentaires pour une détermination plus exacte de l'aire d'alimentation ne sont pas justifiées. En cas de présence de sources potentielles de contamination ne pouvant être éliminées, la prochaine étape vise à préciser l'aire d'alimentation en ciblant la recherche d'information sur les zones à risque et sur les problèmes amenés par cette source ; le degré d'élaboration de l'étude doit être adapté à l'enjeu. Une cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère est réalisée en complément ; elle devrait idéalement couvrir l'aire d'alimentation mais elle est généralement limitée à la surface des aires de protection rapprochée.

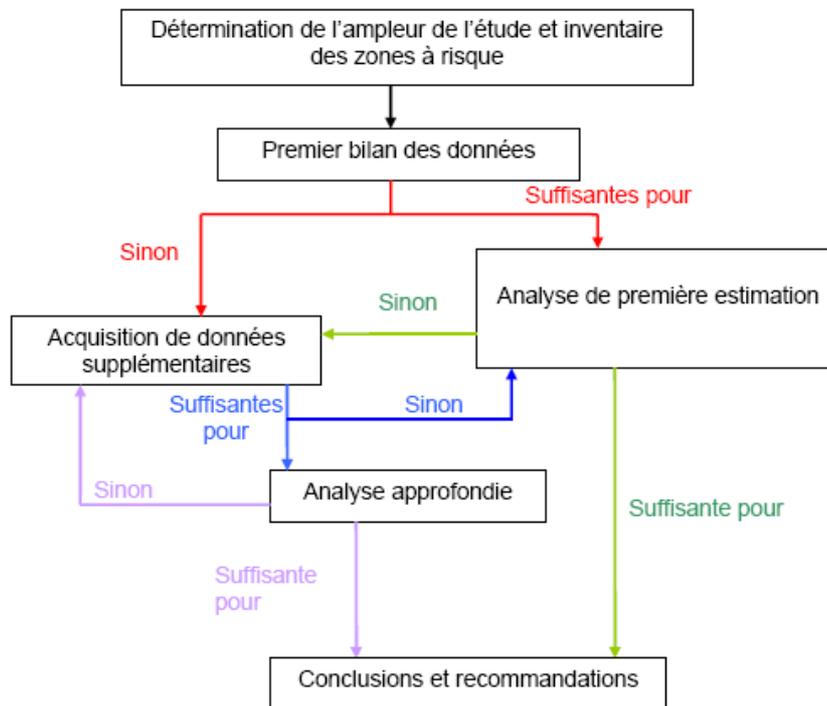


Illustration 76 – Méthodologie de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages élaborée au Québec (in Rasmussen et al., 2006)

Le guide présente la méthode de cartographie de la vulnérabilité DRASTIC (Aller et al., 1987) ; d'autres méthodes d'évaluation peuvent toutefois être utilisées (cf. chapitre 4). L'indice de vulnérabilité DRASTIC correspond à un nombre dont la valeur croît avec le niveau de risque de contamination de l'aquifère (23 à 226) ; son calcul se base sur la cotation de sept paramètres pondérés (par ordre d'importance : profondeur de la nappe, incidence de la zone non saturée, recharge, milieu aquifère, conductivité hydraulique, type de sol et pente du terrain). Les zones affichant un indice élevé devront faire l'objet de mesures sévères pour éviter toute dégradation éventuelle de la qualité des eaux souterraines.

Le choix des actions à entreprendre est basé sur une analyse décisionnelle (avec fonction objective et calcul du risque) purement économique. En particulier la nature de l'étude sera directement liée à l'inventaire des sources potentielles de contamination :

- 1) il n'y a aucune source potentielle de contamination : l'étude sera simple et les aires seront surdimensionnées ;
- 2) il n'y a que quelques sources potentielles de contamination : l'étude sera réalisée avec une précision raisonnable pour déterminer des aires sécuritaires sans exagérer leurs dimensions ;
- 3) il y a plusieurs sources potentielles de contamination : l'étude sera optimisée afin de choisir un scénario de gestion de territoire équilibrant les aspects de coûts de l'étude, de l'impact financier de l'application des aires et de limitation des risques.

Si le contexte nécessite une analyse approfondie, les auteurs proposent un protocole de choix de la méthode d'analyse la plus appropriées (Illustration 77). La sélection d'une méthode d'analyse se fait à partir des caractéristiques hydrogéologiques générales, les phénomènes à étudier, les résultats que l'on veut obtenir et le degré d'exactitude recherché. De plus, pour restreindre le choix des méthodes d'analyse, il faut déterminer si le système à l'étude doit être analysé en régime permanent ou transitoire, en deux dimensions (2D) ou trois dimensions (3D), et s'il s'agit d'un milieu poreux (ou équivalent) ou si un modèle spécifique aux milieux fracturés est nécessaire.

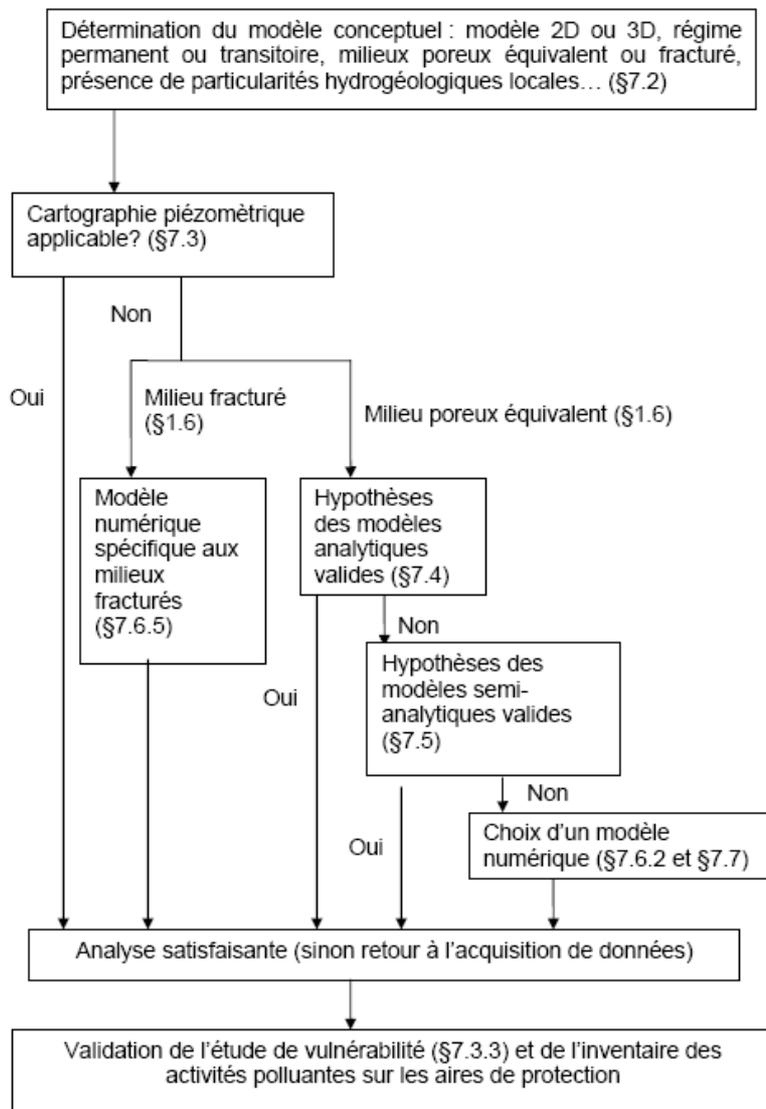


Illustration 77 – Protocole de choix de la méthode d'analyse approfondie (in Rasmussen et al., 2006)

Le Ministère de l'Environnement de la Colombie Britannique a également publié une boîte à outil basée sur un processus en six étapes :

- mettre en place une équipe
- définir la zone de capture (bassin d'alimentation du captage)
- cartographier les sources potentielles de pollution sur le bassin d'alimentation
- développer et mettre en place des mesures de prévention des pollutions
- mettre en place un plan de secours en cas d'accident
- évaluer l'efficacité du plan de protection par des indicateurs

Famille de méthodes	Hypothèses	Données requises	Avantages	Désavantages
Rayon arbitraire fixe (RAF)	Milieux isotropes et homogènes Réseau local d'écoulement non considéré	Aucune	Facile d'utilisation Peu coûteuse	Arbitraire Difficile d'en justifier scientifiquement le choix
Rayon calculé (RC)	Milieux isotropes et homogènes Réseau local d'écoulement non considéré	Débit de pompage de l'ouvrage de captage Épaisseur saturée de l'aquifère Porosité	Facile d'utilisation Peu coûteuse Considère certaines caractéristiques du milieu	Basée sur des hypothèses simples et peu communes
Equations analytiques simples (EA)	Milieux isotropes et homogènes Écoulement horizontal uniforme en régime permanent Ligne de partage des eaux correspond à la limite de l'aire d'alimentation	Débit de pompage de l'ouvrage de captage Transmissivité Gradient hydraulique Porosité Lignes de partage des eaux	Facile d'utilisation Peu coûteuse Considère certaines caractéristiques du milieu	Basée sur des hypothèses simples et peu communes
Cartographie hydrogéologique (CH)	Le sens d'écoulement de l'eau suit la topographie du terrain.	Limites de l'aquifère Courbes piézométriques Courbes topographiques Géologie locale	Considère plusieurs caractéristiques physiques du milieu	Modérément coûteuse Nécessite beaucoup de données
Solutions numériques (SN)	Variables selon le modèle utilisé	Limites de l'aquifère Géologie locale Niveaux piézométriques Transmissivité Conductivités hydrauliques Conditions aux limites	Considère plusieurs caractéristiques physiques du milieu Permet de varier rapidement les paramètres d'outils prévisionnels	Coûteuse Nécessite beaucoup de données

Illustration 78 – Avantages et désavantages des cinq familles de méthodes pour déterminer l'aire d'alimentation et les aires de protection (adapté de BCEMLP, 2000)

Annexe 3

Méthodes de calcul pour la délimitation des zones de contribution à l'alimentation du captage

1. TYPES DE METHODES

Pour délimiter la portion de nappe qui alimente un captage (la *zone d'appel* du captage) on peut distinguer deux grandes familles de méthodes :

- les méthodes déterministes (§ 5.2 à 5.4),
- les méthodes stochastiques (§ 5.5), qui peuvent tenir compte des incertitudes sur les paramètres intervenant dans les calculs. Dans ces méthodes, on génère (en utilisant les outils des méthodes déterministes) un grand nombre de « réalisations » du milieu aquifère (plusieurs centaines) suivant les lois de probabilité que sont supposés suivre les paramètres incertains. Une analyse statistique est faite ensuite sur les grandeurs issues des calculs auxquelles on s'intéresse, par exemple les lignes de courant qui délimitent la zone d'appel du captage.

Ces deux familles de méthodes peuvent utiliser soit des solutions analytiques, soit des modèles numériques.

Les solutions analytiques (§ 5.2) sont de mise en œuvre aisée mais supposent toujours un milieu aquifère simplifié par rapport à la réalité. Ces solutions sont par ailleurs calculées en supposant un régime hydraulique permanent.

Les modèles numériques (§ 5.3) peuvent prendre en compte la complexité du milieu (à condition de disposer des données) et un régime hydraulique transitoire, mais leur mise en œuvre sera moins simple.

Enfin, dans ces deux familles, on peut suivre deux voies :

- l'une purement hydrodynamique, aboutissant à des lignes de courant (illustration 50a) et à des temps de parcours, calculés à partir d'un champ de vitesses (calculs « *en convection pure* ») ;
- l'autre hydrodynamique et hydrodispersive (illustration 50b) tenant compte, en plus de la convection, des phénomènes dispersifs liés à l'hétérogénéité du milieu (calculs en « *convection-dispersion* »).

Remarques

1) Le calcul de temps de parcours implique l'introduction de la **porosité cinématique** qui permet de calculer la vitesse réelle de l'écoulement.

2) La méthode hydrodispersive nécessite de prendre en compte l'équation du transport de masse, plus ou moins simplifiée, et d'introduire un paramètre caractérisant la capacité de dispersion du milieu : la **dispersivité**, dont la connaissance s'acquiert en interprétant des traçages. Par rapport au cas convectif pur, on raisonne ici en terme de capture possible de « particules » susceptibles de pénétrer dans la zone d'appel du forage par dispersion : à la zone d'appel proprement dite, issue des calculs hydrodynamiques, se substitue donc une *zone de capture*, plus large. Cette méthode est peut être plus sécuritaire, mais nécessite l'utilisation de solutions analytiques complexes ou bien des logiciels intégrant les équations du transport de masse.

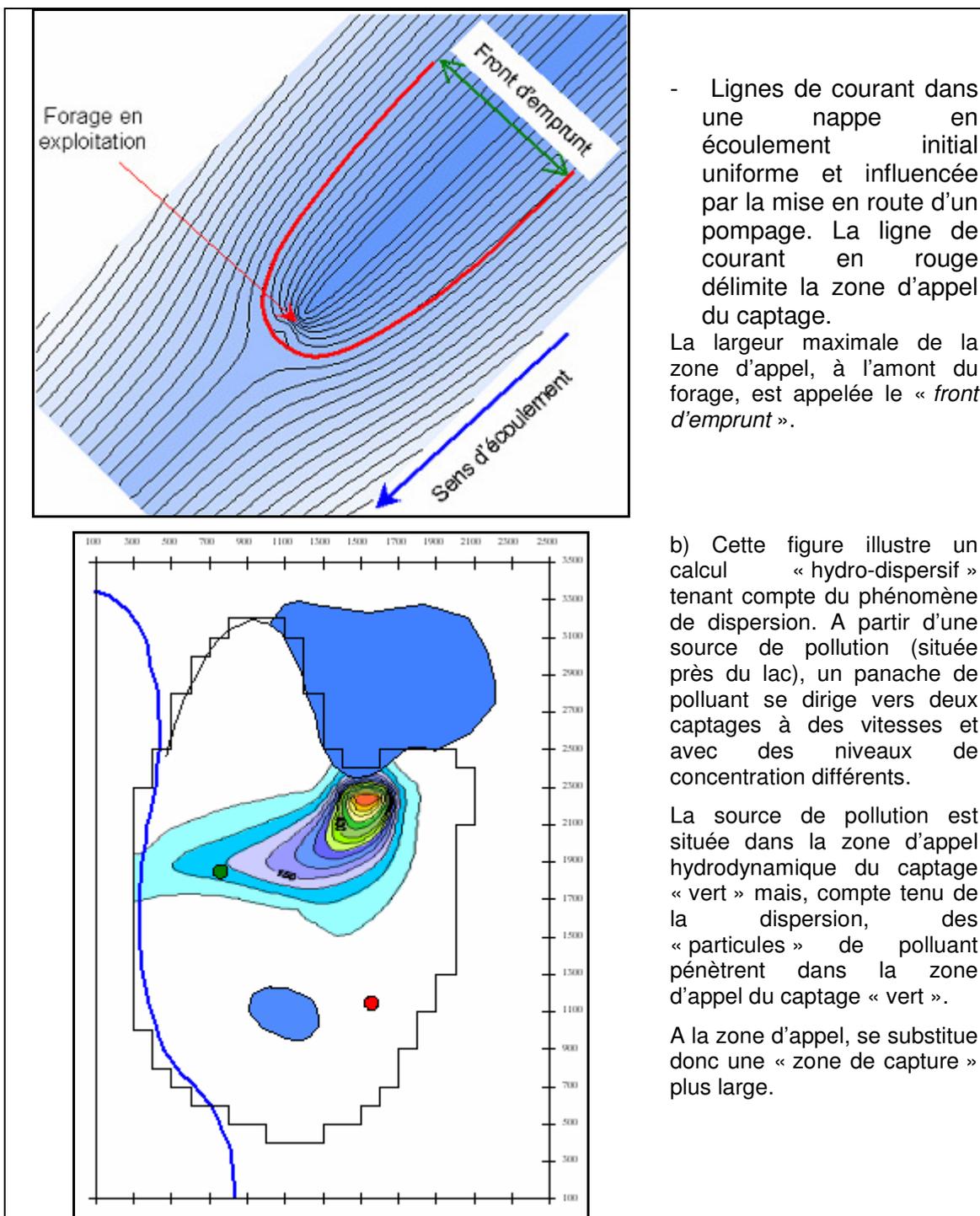


Illustration 79 – Exemple d'approches pour la délimitation d'un périmètre de protection.

2. SOLUTIONS ANALYTIQUES

Les paragraphes qui suivent sont extraits de la note technique BRGM "Principes de résolution et solutions analytiques de quelques problèmes simples d'écoulements et de transport de masse en milieux poreux saturés et non saturés" (J.J. Seguin, 2001).

Exposé d'une méthode de délimitation de la zone d'appel d'un captage

La méthode décrite ci-dessous peut être utilisée pour la délimitation de la zone d'appel d'un captage. Il s'agit d'une méthode déterministe reposant sur les équations générales de l'hydrodynamique, simplifiées pour qu'une solution analytique puisse être développée.

L'aquifère est supposé:

- homogène et isotrope, poreux ou poreux équivalent,
- non borné par des limites,
- d'épaisseur constante E, de perméabilité K

On suppose de plus:

- que l'écoulement général de la nappe, en l'absence du pompage, est unidirectionnel, de vitesse constante V_u (écoulement "uniforme"),
- qu'il n'y a pas de recharge
- qu'un régime hydraulique stationnaire est établi

On choisit un référentiel (x, y) dont l'origine coïncide avec l'emplacement du puits de pompage et dont l'axe des x est parallèle au vecteur vitesse V_u .

On note:

- Q le débit de pompage,
- J le gradient hydraulique,
- q_u le débit par unité de largeur de l'écoulement uniforme: $q_u = K.E.J$

Equation de la zone d'appel en coordonnées radiales

Avec les hypothèses énumérées ci-dessus, un pompage dans un écoulement uniforme crée une inflexion des lignes de courant telle que le montrent les figures ci-dessous.

Sur l'illustration 80, la zone d'appel du captage est délimitée par deux lignes de courant particulières, une dans chaque demi-plan, qui se rejoignent en un point d'arrêt à l'aval du captage.

L'équation de ces 2 lignes de courant est donnée par (avec les notations introduites ci-dessus) :

$$\boxed{y = \frac{Q}{2.q_u} \left(\pm 1 - \frac{\theta}{\pi} \right) \quad x = \frac{y}{\operatorname{tg} \theta} \quad -\pi < \theta < \pi \quad q_u = K.E.J \quad [E1]}$$

+1 dans le demi plan supérieur ($0 < \theta < \pi$), -1 dans le demi-plan inférieur ($-\pi < \theta < 0$).

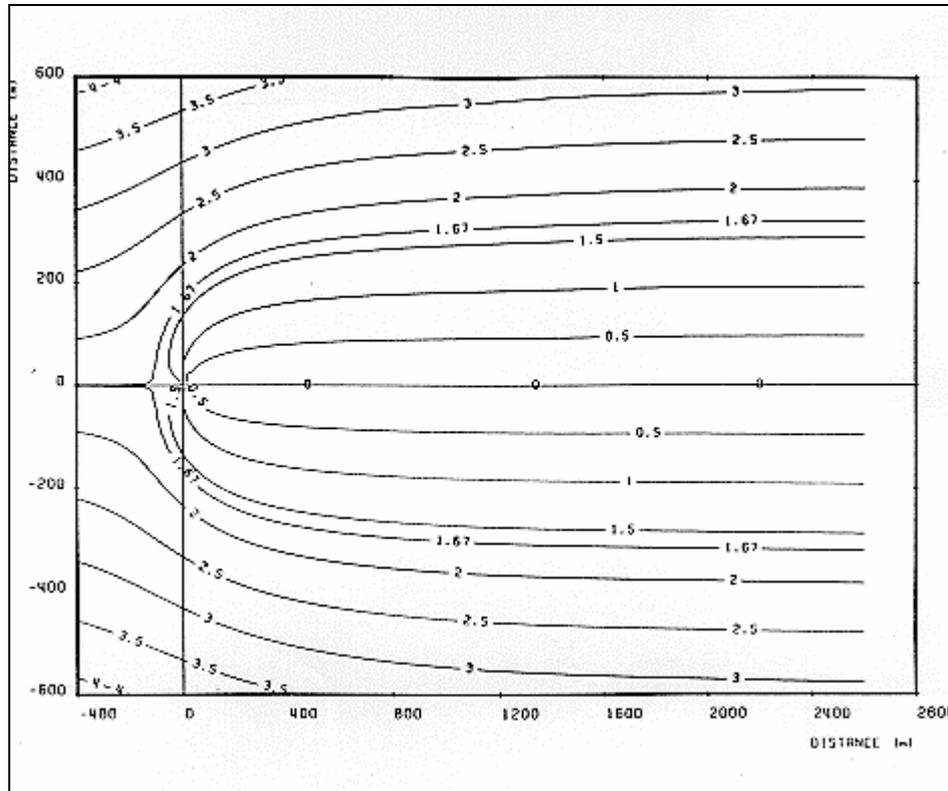


Illustration 80 - Lignes de courant dans un écoulement uniforme conjugué à un pompage (les lignes de courant correspondent aux valeurs de la fonction de courant et sont graduées)

Equation de la zone d'appel en coordonnées cartésiennes (Grubb, 1993)

En nappe captive :

$$x = \frac{y}{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi T J}{Q} y\right)}$$

En nappe libre :

$$x = \frac{y}{\operatorname{tg}\left[\frac{\pi K (c_1^2 - c_2^2)}{QL} y\right]}$$

Ou c_1 et c_2 représentent les charges piézométriques amont et aval

Largeur du front d'emprunt :

Lorsqu'on s'éloigne du puits vers l'amont, les branches de la ligne de courant donnée par l'équation E1 tendent vers une horizontale. Autrement dit, quand θ tend vers 0 :

$$y \rightarrow \pm \frac{Q}{2q_u}$$

La distance entre ces deux branches horizontales est donc : $L_f = \frac{Q}{q_u}$

Exemples de délimitation d'une zone d'appel

Le pompage est de 36 m³/h dans une nappe libre dont les caractéristiques sont les suivantes:

- perméabilité $K = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s
- gradient $J = 0.3$ % à l'état non influencé → vitesse de Darcy: $V = 1.5 \cdot 10^{-6}$ m/s
- porosité cinématique: $\omega = 5\%$ → vitesse réelle: $u = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s = 2.59 m/j
- épaisseur moyenne $E = 30$ m

La direction d'écoulement est inclinée d'un angle θ par rapport à l'axe des x.

On calcule le débit par unité de largeur de la nappe non influencée:

$$q_u = K.E.J = 4.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} = 0.162 \text{ m}^2/\text{h}$$

On délimite la zone d'appel du captage à l'aide de l'équation E1 ci-dessus en opérant sur les coordonnées une rotation d'un angle θ (Illustration 81)

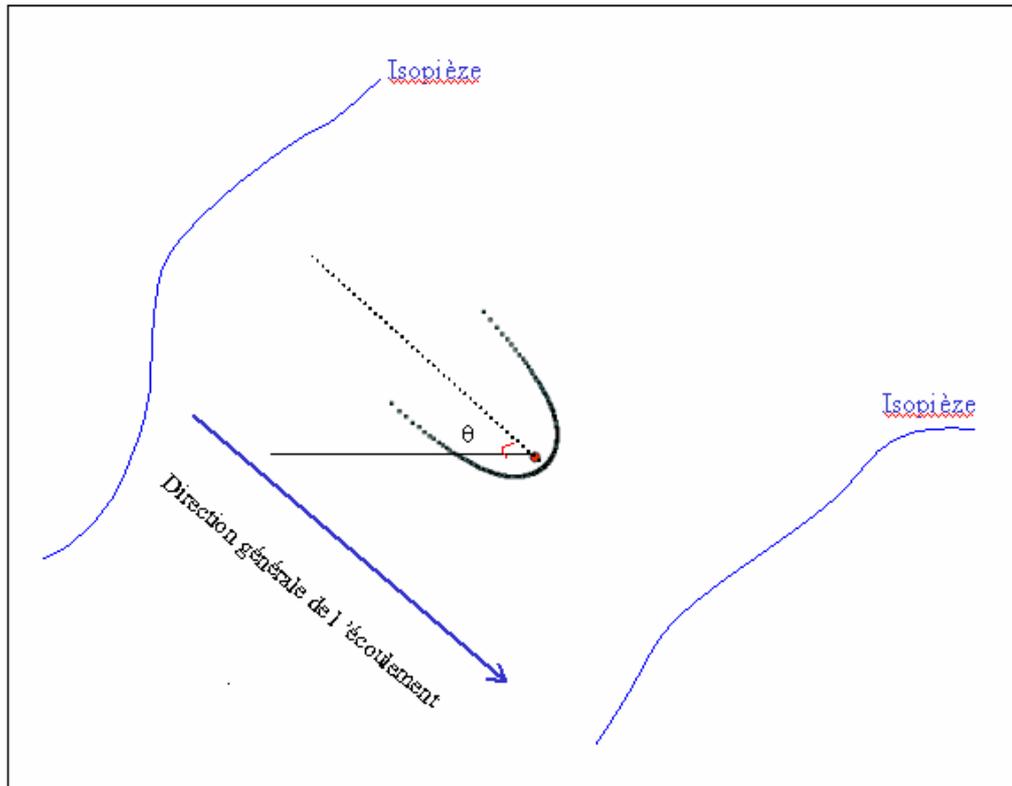


Illustration 81 - Délimitation de la zone d'appel d'un captage à l'aide de la relation E1 avec rotation de la solution pour s'ajuster sur la direction générale d'écoulement

Cet second exemple est extrait de la note technique : "Examen de la pertinence de la définition du périmètre de protection éloignée de "La fontaine Bourreau", Commune de Montreuil-Bellay- Maine et Loire (J.J. Seguin – BRGM - 18 Juillet 2005)

Les tests de pompages qui ont été réalisés lors d'études antérieures conduisent à une transmissivité comprise entre 10^{-2} m²/s et 3.10^{-2} m²/s. Le rapport de l'hydrogéologue agréé (H. Etienne, 21 Déc. 1988) qui mentionne ces valeurs fait par contre état de l'incertitude sur le sens d'écoulement général de la nappe ("*on peut penser que l'axe d'écoulement principal est orienté approximativement SW-NE*") et sur la valeur du gradient hydraulique ("*le gradient hydraulique serait de l'ordre de $2. 10^{-3}$: 2 m / km*").

Dans le cadre de l'examen de ce dossier, ces éléments d'information ont été utilisés pour déterminer l'aire d'alimentation du captage. **La délimitation a été établie à partir des lois de l'hydrodynamique pour un captage dans un écoulement uniforme en milieu homogène.**

Les valeurs utilisées sont:

- transmissivité: 10^{-2} m²/s
- gradient :0.2 %

- pompage: 150 m³/h
- direction : deux cas traités: angle de -135° par rapport à l'axe Ox (demi-plan inférieur) et angle de -120°

Les aires d'alimentation, pour les 2 cas traités, sont représentées sur l'illustration 56 ci-après.

On peut noter que:

- 1) ces aires d'alimentation n'englobent que partiellement le périmètre de protection éloignée; en particulier, la partie Nord-Est apparaît non concernée (nord de Trézé);
- 2) la zone industrielle de Méron est totalement incluse;
- 3) les tronçons de la D 718 et de la N147 à l'intérieur du périmètre éloigné se retrouvent en grande partie, dans les 2 cas de figure, à l'intérieur de l'aire d'alimentation.

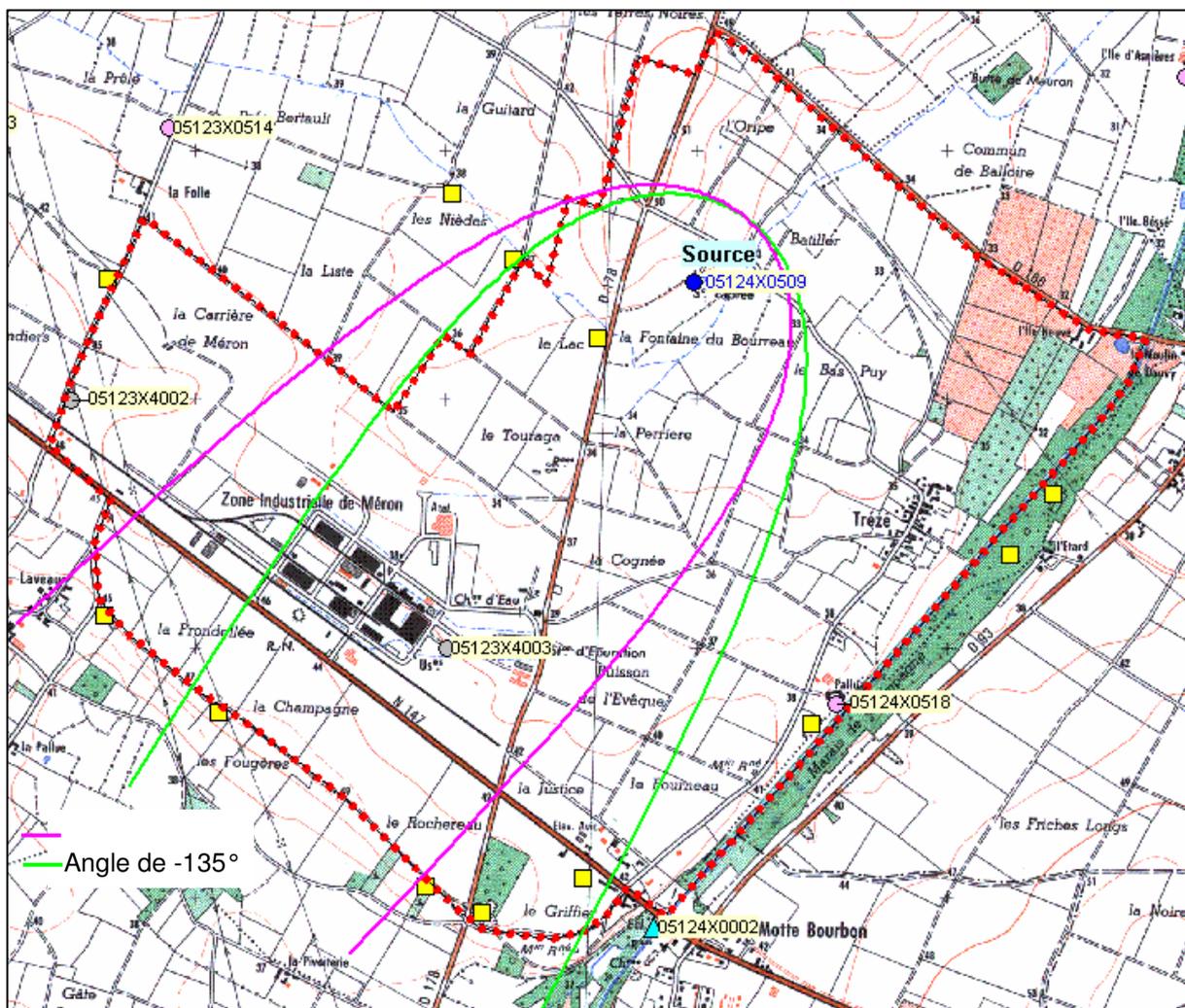


Illustration 82 – Exemple de délimitation de l'aire d'alimentation d'un captage par une méthode analytique

Limites des méthodes analytiques

Comme déjà mentionné ci-dessus, les méthodes analytiques sont d'utilisation aisée, (peu de paramètres, temps de calculs très courts) mais leur champ d'application reste limité à des milieux aquifères et à une hydrodynamique relativement simples. Rappelons les conditions d'application des solutions les plus souvent utilisées (facilement programmables, par exemple dans EXCEL) :

Aquifère :

- homogène et isotrope (décrit par une perméabilité unique K)
- non borné par des limites,
- d'épaisseur constante E ,

Hydrodynamique :

- écoulement général de la nappe, en l'absence du pompage, unidirectionnelle et de vitesse constante (écoulement « uniforme »),
- pas de recharge,
- régime hydraulique stationnaire.

Les limites sont également liées à l'incertitude sur les paramètres hydrodynamiques, transmissivité et plus encore coefficient d'emmagasinement qui sont souvent mal connus.

3. MODELES NUMERIQUES

3.1. Généralités

Pratiquement tous les logiciels de modélisation hydrodynamique actuels permettent de déterminer la zone d'appel d'un captage avec prise en compte d'un contexte hydrogéologique plus complexe que celui autorisé par les méthodes analytiques.

Leur utilisation peut être plus ou moins aisée suivant leur degré de sophistication. Le tableau ci-après rappelle quelles doivent être les données de base nécessaires à une modélisation (en plus des données géologiques définissant la géométrie du modèle, en particulier la position du substratum de la nappe).

Le problème majeur que la mise en œuvre d'un modèle numérique pose toujours est celui des limites. Des limites « sûres » sont parfois éloignées de la zone d'intérêt et les conditions à imposer ne sont pas toujours évidentes. Les potentiels imposés sont pratiques mais constituent une contrainte plus ou moins forte qu'il convient d'évaluer.

<u>Paramètres hydrodynamiques.</u> Ils sont spatialisés et doivent être « entrés » dans tout le maillage. Seules quelques valeurs étant connues, ces paramètres doivent être restitués par le calage du modèle sur les observations piézométriques, les jaugeages,.. Mais on peut toujours introduire des valeurs supposées plausibles	Perméabilité	
	Coefficient d'emmagasinement libre	Uniquement en régime transitoire
<u>Paramètres hydrodispersifs</u> Ils sont spatialisés et doivent être « entrés » dans tout le maillage. Les valeurs s'obtiennent en interprétant des traçages Mais on peut toujours introduire des valeurs supposées plausibles	Porosité cinématique	Pour le calcul des temps de parcours et si prise en compte des processus de transport de masse.
	Dispersivités longitudinale+transversale	Si prise en compte du transport de masse
<u>Données variables dans le temps</u> Doivent être introduites par maille (prélèvements, injections) ou par zone (recharge par infiltration). Dans le cas d'un régime permanent on utilise des valeurs se rapportant à la période choisie.	Recharge	Doit être estimée a priori à l'aide d'un bilan hydrique à partir de la pluie, de l'ETP et de la « réserve utile » des sols. La recharge calculée a priori peut être ajustée lors du calage
	Prélèvements	
<u>Données utilisées pour le calage</u> (Certaines sont imposées sur les limites du modèle).	Piézométrie	- Mesures ponctuelles, cartes - Chroniques (pour le régime transitoire)
	Débits aux exutoires	Sources, cours d'eau, drains

Illustration 83 – Données de base nécessaires pour une modélisation hydrodynamique et hydrodispersive

3.2. Logiciels

Il existe de nombreux logiciels 2D et 3D pouvant, entre autres possibilités, calculer des lignes de courant et délimiter la zone d'appel d'un captage, la plupart développé aux Etats-Unis.

Pour se limiter à ceux dédiés uniquement aux calculs de lignes de courant, on peut citer : MODPATH de l'USGS (Pollock, 1994), GWPATH (Shafer, 1989), FLOWPATH (Franz and Guiguer, 1990), PATH3D (Zheng, 1989), WHPA (EPA,1993).

Deux autres logiciels, en libre accès et relativement faciles à utiliser, sont présentés ci-dessous : ASMWIN et WhAEM.

- **Logiciel ASMWIN** (Aquifer Simulation Model)

Ce logiciel (W. Kinzelbach, 1994, ETH Zurich), développé sous Windows, est téléchargeable à partir du site <http://www.ifu.ethz.ch/publications/software/asmwin>. D'utilisation aisée, il permet de simuler en 2D des problèmes simples d'hydrodynamique et de pollution.

Comme avec d'autres logiciels, la délimitation de la zone d'appel se fait de façon automatique en plaçant régulièrement autour du captage des points de départ de lignes de courant correspondant à des « particules » fictives qui se déplacent le long des lignes de courant, d'où le nom de « particle tracking » données à ces méthodes (illustration 57). Les calculs se font en remontant vers l'amont à partir du captage (trajectoires dites « inverses » ou « backward tracking » ou « reverse tracking »).

- **Logiciel WhAEM** (Wellhead Analytic Element Model)

Il s'agit d'un logiciel 2D, développé par l'EPA, basé sur la méthode des éléments analytiques (Haitjema, 1995). Ce modèle est en téléchargement libre sur le site de l'EPA (<http://www.epa.gov/athens/software/whaem/index.html>). (version de 2005)

L'aquifère est supposé monocouche, homogène et isotrope. Le gradient régional est uniforme ainsi que la recharge. Des limites latérales peuvent être prises en compte. L'élévation de la base de l'aquifère est considérée constante. Le régime d'écoulement est supposé permanent.

Le logiciel permet de vérifier les résultats, en termes de charge hydraulique, à partir de données ponctuelles de terrain. Il est possible d'obtenir l'aire d'alimentation et les isochrones pour un temps de transfert donné à partir du tracé des lignes de courant. Il s'agit alors d'imposer pour la simulation un temps de transfert maximal égal à la valeur désirée (illustration 58).

Par rapport aux solutions analytiques du § 5.2., WhAEM permet de tenir compte d'une recharge uniforme ainsi que de conditions aux limites d'alimentation ou imperméable. Cependant, l'aquifère doit toujours être considéré comme homogène et isotrope.

- **Logiciel WHPA** (Wellhead Protection Area)

WHPA est un outil de simulation semi-analytique 2D utilisé pour délimiter les zones d'appel. Egalement développé par l'EPA, et plus ancien que WhAEM, il est en téléchargement libre sur le site de l'EPA <http://www.epa.gov/ada/csmos/models/whpa.html> (version de 1993)

Il s'applique à tout type d'aquifère (libre, captif, semi-captif) et prend en compte des limites étanches et des limites à potentiel imposé. Il permet également de prendre en compte des pompages multiples et des puits d'injection et de faire une analyse de sensibilité par rapport à l'incertitude des paramètres d'entrée du modèle.

Ces outils gratuits sont suffisants dans la plupart des cas pour les aquifères de type sédimentaire. Il existe de nombreux autres outils commerciaux, qui peuvent s'avérer utile si l'on a affaire à des systèmes complexes, mais nécessitent d'être mis en œuvre par des spécialistes :

- TWODAN www.fittsgeosolutions.com/twodan.htm
- FLOWPATH <http://www.flowpath.com>
- MODFLOW www.waterloohydrogeologic.com
- FEFLOW www.feflow.com
- MARTHE (THIERY et al., 2004)] www.brgm.fr

On peut également citer des outils de modélisation plus spécifiquement adaptés aux milieux fracturés :

- SDF/RSF basé sur la génération de réseaux stochastiques de fractures en 2D (Bradbury et Muldoon, 1994),
- FracMan/MAFIC <http://fracman.golder.com>
- FRACTRAN http://www.flowpath.com/software/fractran/fractran_ov.htm
- FRAC3DVS http://www.flowpath.com/software/frac3dvs/frac3dvs_ov.htm
- SWIFT <http://scisoftware.com>

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

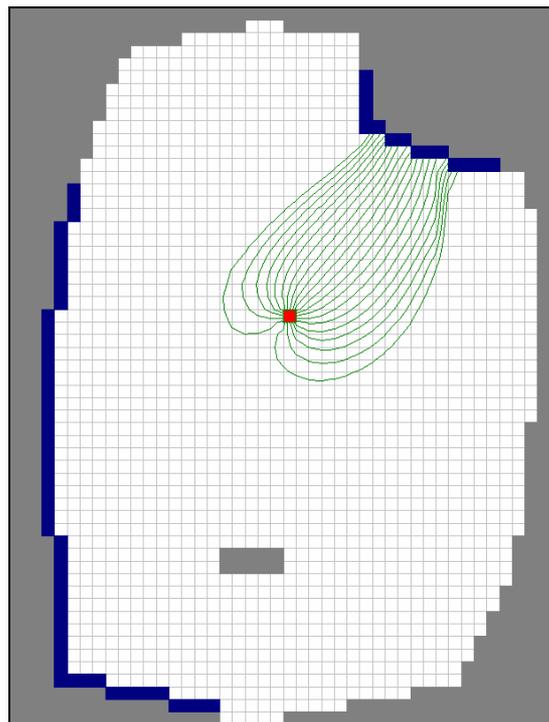
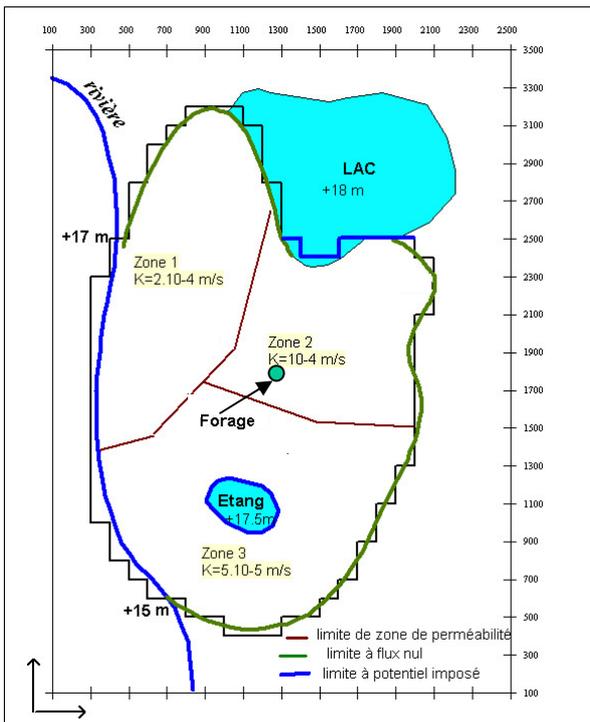
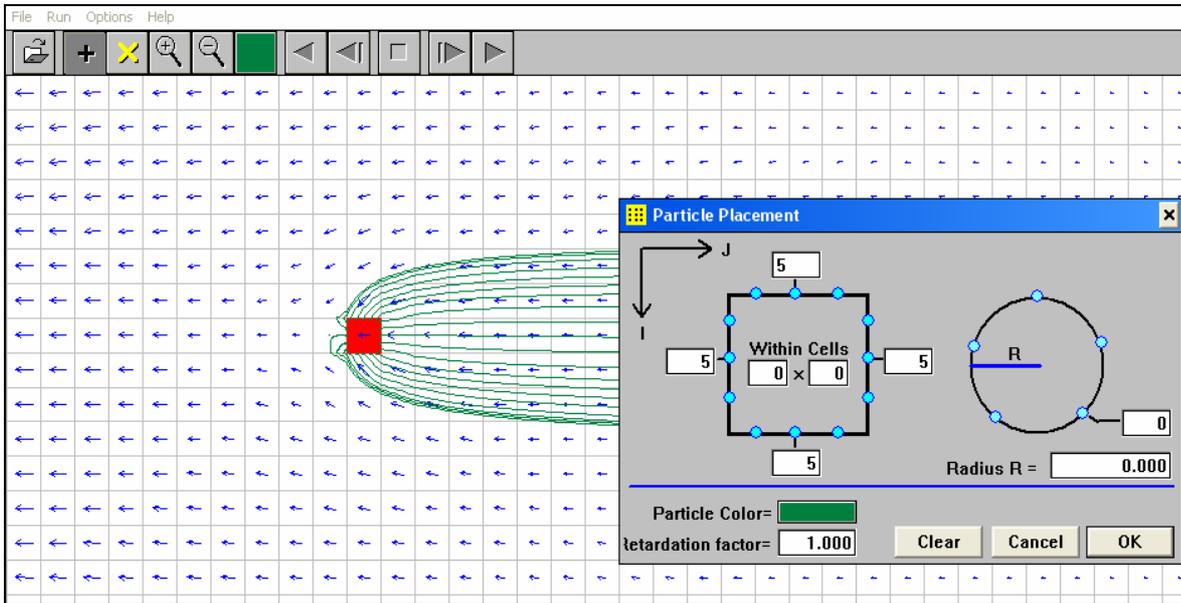


Illustration 84-Délimitation automatique de la zone d'appel d'un captage (logiciel ASMWIN)

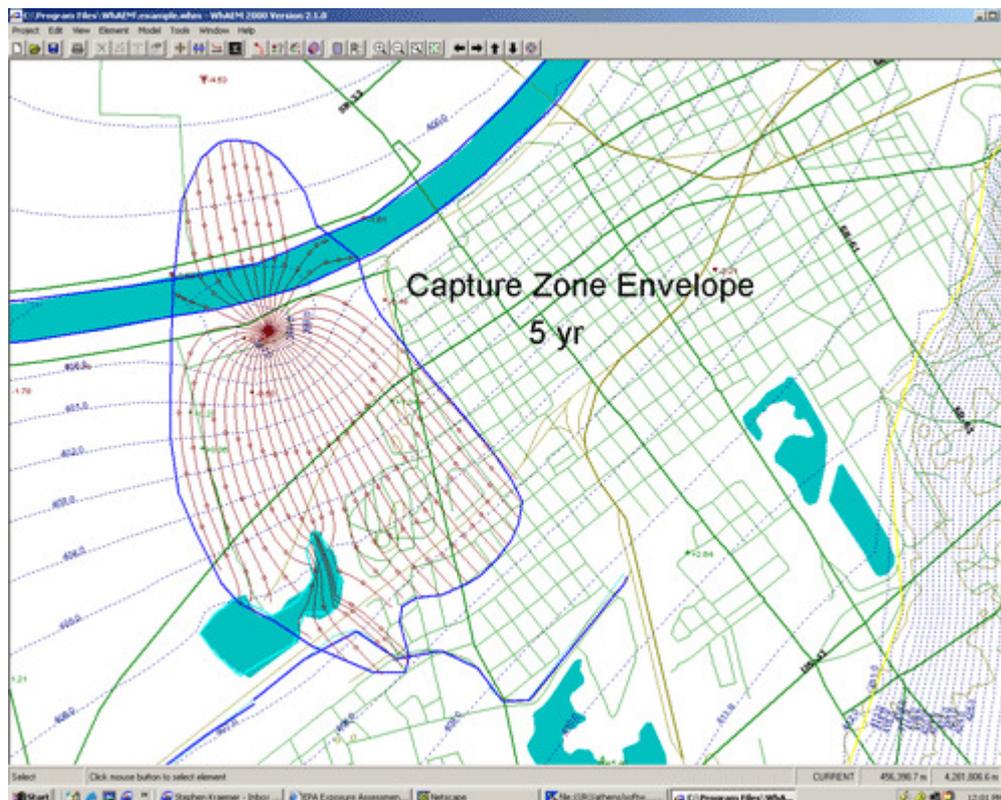


Illustration 85 - Exemple de délimitation d'un BAC avec l'outil WhAEM (source EPA)

3.3. Prise en compte d'un régime non stationnaire

La prise en compte d'un régime non stationnaire (ou transitoire) ne peut être envisagé que par l'intermédiaire d'un modèle numérique.

Cet aspect a été étudié en détail par Rock et Kupfersberger (2002). L'illustration 86 extraite de cet article illustre très clairement la différence entre une zone d'appel délimitée en tenant compte de la variabilité des écoulements et une zone d'appel délimitée en régime stationnaire en situation de hautes eaux d'une part (a) et de basses eaux d'autre part (b). Les 2 zones d'appel hautes eaux/ basses eaux sont très différentes l'une de l'autre et de la zone d'appel calculée continûment en régime transitoire.

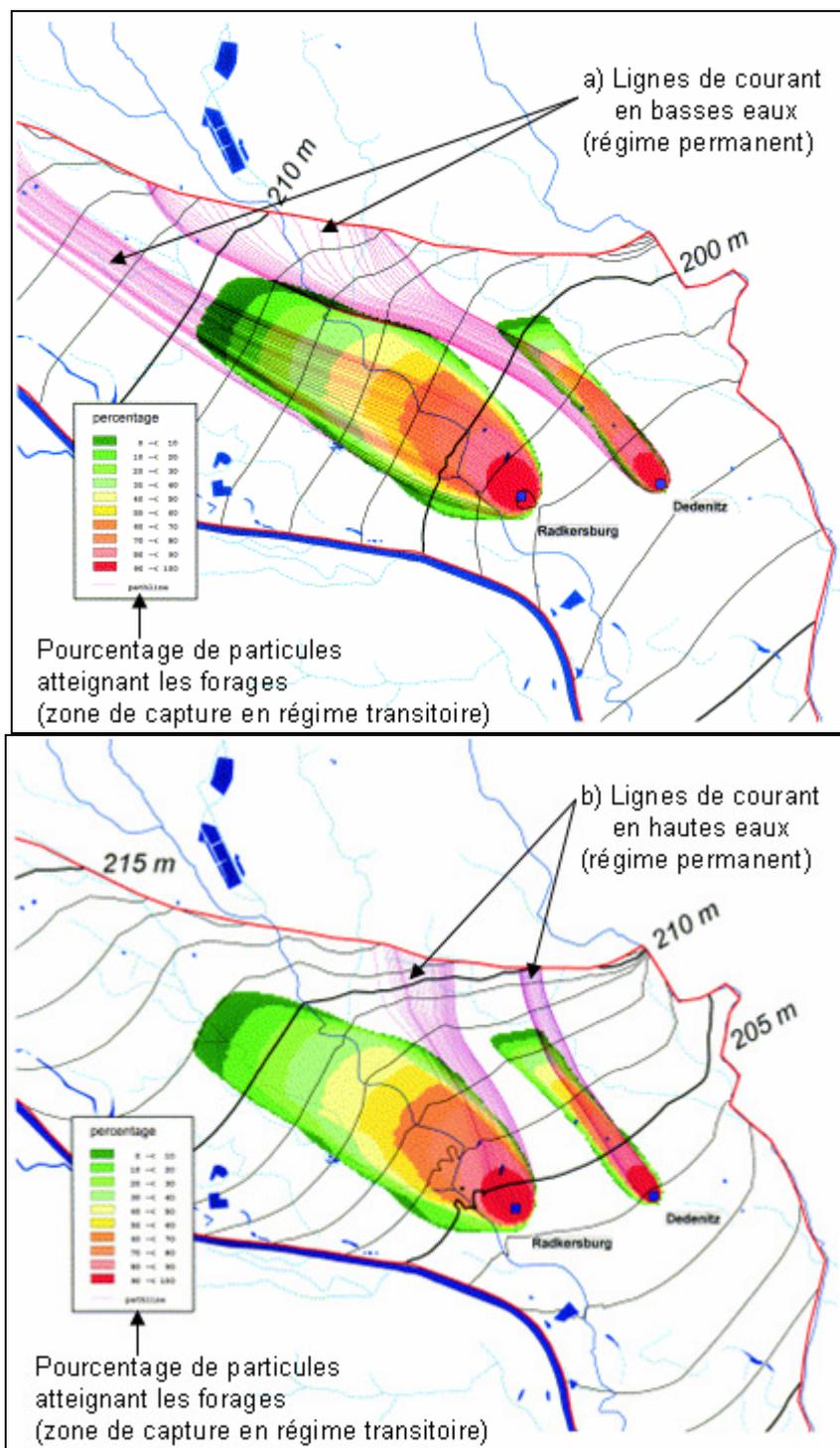


Illustration 86 – Comparaison entre zones d'appel délimités en régime transitoire et en régime permanent (G. Rock, H. Kupfersberger, 2002)

4. METHODES STOCHASTIQUES

Elles peuvent être mises en œuvre soit à partir de solutions analytiques soit à partir de modèles numériques.

L'objectif est d'estimer l'incertitude sur le tracé de la zone d'appel en tenant compte de l'incertitude sur les paramètres du calcul: perméabilité, épaisseur aquifère, gradient hydraulique, porosité cinématique (pour les temps de parcours).

Pour cela différentes méthodes sont possibles, par exemple la méthode dite de "Monte Carlo".

On considère les paramètres comme des variables aléatoires $X_K, X_\omega, X_E, \dots$ chacune caractérisée par une loi de probabilité associée à une moyenne et à un écart type, par exemple une loi Log-normale pour la perméabilité et une loi normale pour la porosité.

On procède alors à des tirages aléatoires dans ces distributions de probabilité de moyenne et d'écart-type donnés (plusieurs centaines de tirages sont nécessaires). Chaque tirage fournit un sous-ensemble de valeurs ($x_K, x_\omega, x_E, \dots$) correspondant à une "réalisation" possible du milieu aquifère.

Pour chaque sous ensemble, on calcule avec la solution analytique ou le modèle que l'on a choisi la grandeur de sortie, par exemple les coordonnées des lignes de courant délimitant la zone d'appel du captage si l'on utilise la solution analytique S2 du § 5.2 ci-dessus:

$$y = \frac{Q}{2.q_u} \left(\pm 1 - \frac{\theta}{\pi} \right) \quad \text{avec } q_u = K.E.J \quad \text{et } -\pi \leq \theta \leq \pi$$
$$x = y / \operatorname{tg}\theta$$

Pour quelques valeurs de l'angle θ , on peut calculer la distance radiale $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ et pour chaque angle, on peut ensuite tracer la fonction de répartition (probabilité cumulée) de la variable r et en déduire des fréquences d'occurrence de tel ou tel intervalle de valeurs de r (θ). (illustration 60).

Le logiciel GMS (http://www.scisoftware.com/products/gms_details/gms_details.html) est censé permettre la réalisation de modélisations stochastiques avec MODFLOW, dans le même esprit que décrit par Vassolo *et al.* (1998).

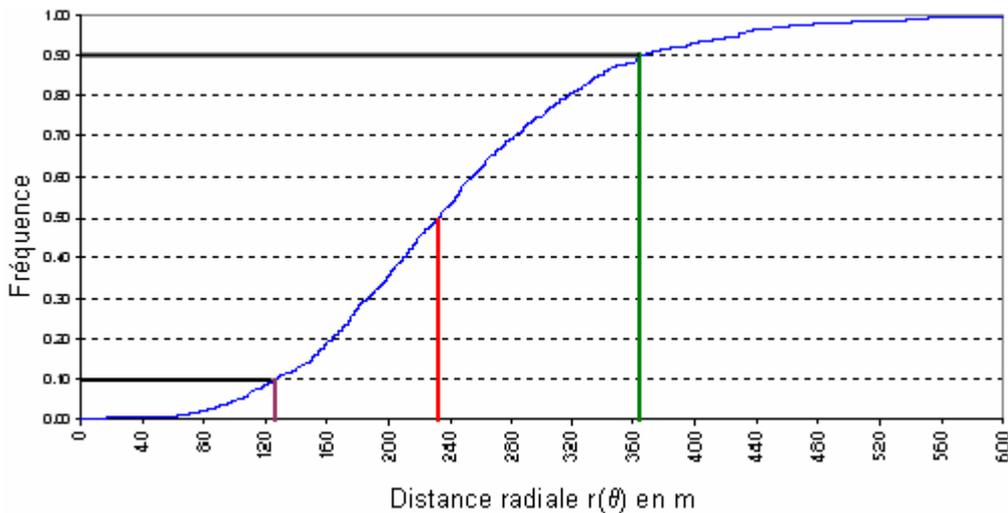


Illustration 87- Distribution de probabilité cumulée de la distance radiale pour un angle θ donné

5. PROCESSUS D'INFILTRATION

Les éléments présentés ci-dessous sont repris du cours d'hydrologie générale de Musy <http://hydram.epfl.ch/e-drologie>

Parmi les nombreux modèles existants, on peut retenir deux grandes approches, à savoir :

- une approche basée sur des relations empiriques, à 2, 3 ou 4 paramètres,
- une approche à base physique.

Relations empiriques

Les relations empiriques expriment une décroissance de l'infiltration en fonction du temps à partir d'une valeur initiale (soit exponentiellement, soit comme une fonction quadratique du temps) qui tend vers une valeur limite, en général K_s , mais pouvant être proche de zéro. Citons à titre d'exemple deux formules empiriques :

- **La formule de Horton** - La capacité d'infiltration s'exprime comme suit :

$$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \cdot e^{-rt} \quad (3 \text{ paramètres}) \quad (5.2)$$

Avec :

$i(t)$: capacité d'infiltration au temps t [mm/h],

i_0 : capacité d'infiltration initiale dépendant surtout du type de sol [mm/h],

i_f : capacité d'infiltration finale [mm/h],

t : temps écoulé depuis le début de l'averse [h],
 γ : constante empirique, fonction de la nature du sol [min^{-1}].

L'utilisation de ce type d'équation, quoique répandue, reste limitée, car la détermination des paramètres, i_0 , i_f , et γ présente certaines difficultés pratiques.

- **La formule de l'Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux de l'EPFL** - La relation est légèrement différente de celle de Horton (seulement deux paramètres). Elle est du type :

$$i(t) = i_f + a \cdot e^{-bt} \quad (5.3)$$

Avec :

$i(t)$: capacité d'infiltration au temps t [mm/h],
 i_f : capacité d'infiltration finale [mm/h],
 a et b : coefficients d'ajustement.

Cette relation a l'avantage de permettre la recherche de relations fonctionnelles, d'une part entre la capacité limite (ou finale) d'infiltration et la texture du sol, d'autre part entre le paramètre a et l'humidité volumique. On lève ainsi l'indétermination sur certains paramètres par l'intervention de caractéristiques objectives.

D'autres formules peuvent être utilisées pour déterminer le régime d'infiltration de l'eau du sol (cf. tableau 5.1). Elles font toutes appel à des coefficients empiriques à évaluer en fonction du type de sol rencontré.

5.2.4.2 Modèles à base physique

Ces modèles décrivent d'une manière simplifiée le mouvement de l'eau dans le sol, en particulier au niveau du front d'humidification et en fonction de certains paramètres physiques. Parmi les modèles existants, les deux modèles suivants sont les plus connus :

- **Le modèle de Philip** - Philip a proposé une méthode de résolution de l'équation de l'infiltration verticale pour certaines conditions initiales et limites. Ce modèle introduit la notion de **sorptivité** qui représente la capacité d'un sol à absorber l'eau lorsque l'écoulement se produit uniquement sous l'action du gradient de pression. La sorptivité est définie par la lame infiltrée I en écoulement horizontal. Elle dépend des conditions initiales et des conditions aux limites du système. Elle est fonction des teneurs en eau initiale du sol θ_i et imposée en surface θ_0 .

$$i(t) = \frac{1}{2} \cdot s \cdot t^{-0.5} + A$$

s : sorptivité [cm.s^{-0,5}]

A : composante gravitaire fonction de la conductivité hydraulique à saturation [cm/s]

- **Le modèle de Green et Ampt** - Un autre modèle tout aussi connu que le précédent est celui de Green et Ampt. Ce modèle repose sur des hypothèses simplificatrices qui impliquent une schématisation du processus d'infiltration (Illustration 88).

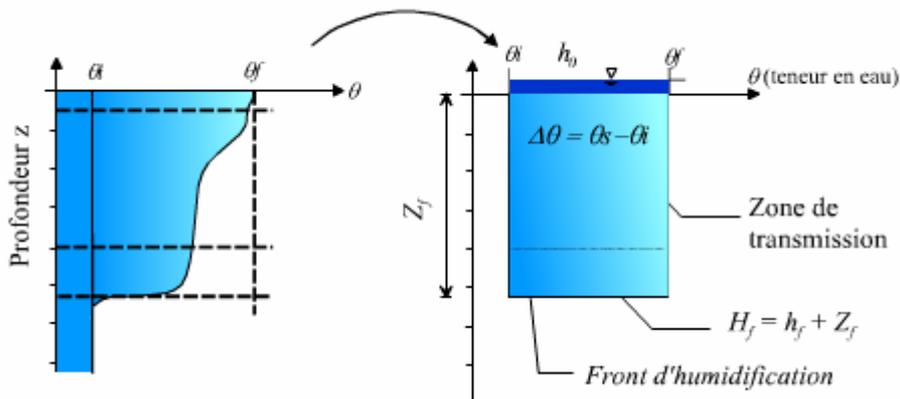


Illustration 88 - Schématisation du processus de l'infiltration selon Green et Ampt

Il est basé sur la loi de Darcy et inclut les paramètres hydrodynamiques du sol tels que la charge hydraulique K_s , au niveau du front d'humidification (h_f est la somme de la hauteur d'eau infiltrée depuis le début de l'alimentation - z_f - et de la charge de pression au front d'humidification - h_f) et en surface ($H_0 = h_0 =$ charge de pression en surface). Une des hypothèses du modèle de Green et Ampt stipule que la teneur en eau de la zone de transmission est uniforme. L'infiltration cumulative $i(t)$ résulte alors du produit de la variation de teneur en eau et de la profondeur du front d'humidification. Ce modèle s'avère satisfaisant dans le cas de son application à un sol dont la texture est grossière. Cette méthode reste cependant empirique puisqu'elle nécessite la détermination expérimentale de la valeur de la charge de pression au front d'humidification.

$$i(t) = K_s \left(1 + \frac{h_0 - h_f}{z_f(t)} \right)$$

Annexe 4

Description détaillée des différentes méthodes de cartographie de la vulnérabilité et présentation d'un exemple d'application

1. *Méthode IDPR/ZNS*
2. *Méthode DRASTIC*
3. *Méthode SINTACS*
4. *Méthode EPIK*
5. *Méthode RISKE, RISK*
6. *Méthode RISKE « modifiée »*
7. *Méthode COP*
8. *Méthode PI*
9. *Méthode LEA (approche européenne)*
10. *Méthode DISCO pour les aquifères fissurés*
11. *Méthode de cartographie de la vulnérabilité spécifique*
12. *Méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers*
13. *Exemple d'application de la méthode RISK en Franche-Comté*

1. Méthode IDPR/ZNS

L'analyse simplifiée de la vulnérabilité des eaux souterraines est fondée sur la combinaison de deux critères (Mardhel et Gravier, 2005) :

- L'épaisseur de la zone non saturée (ZNS) : déduite de l'approche régionale des niveaux d'eau souterraine comparée au modèle numérique de terrain au pas de 50 m.
- L'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) qui tend à unifier et simplifier l'approche géomorphologique relative à la nature des formations de couverture des premières nappes rencontrées. Il permet une analyse régionale simplifiée de la vulnérabilité des eaux qui en l'absence de données précise du milieu saturé, s'applique aux nappes dites phréatiques.

L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. A l'échelle du Bassin de Seine-Normandie, la cartographie de cet indice est conforme au comportement attendu des grandes régions géologiques avec une répartition qui souligne la disposition à l'infiltration des terrains naturels. Dans le domaine sédimentaire, la vulnérabilité des

eaux souterraines est de manière générale plus importante et en particulier dans les vallées où la vulnérabilité devient très forte (faible épaisseur de la zone non saturée).

L'idée qui sous tend l'IDPR découle de l'observation que ***l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent.***

Dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, seule la pente et la morphologie des reliefs guident la mise en place des cours d'eau. Or dans le milieu naturel, comme nous venons de le voir ci-dessus, les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol ont une influence significative sur l'établissement des réseaux hydrographiques.

En effet, la nature des surfaces des bassins a un rôle primordial sur le comportement hydrologique de ceux-ci. Les paramètres qui interviennent sont la lithologie, la pédologie et la couverture végétale. Ces paramètres influencent grandement la perméabilité et la rugosité de la surface, qui conditionnent à leur tour la vitesse du ruissellement et le rapport de l'écoulement sur l'infiltration, appelé aussi coefficient d'écoulement.

La densité de drainage est donc un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage élevée.

L'IDPR devient ainsi le moyen de quantifier ce rôle en comparant **un réseau théorique** établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (*indice de développement ID*), **au réseau naturel** mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (*de persistance des réseaux PR*). L'indice de développement et de persistance des réseaux présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux.

Le réseau hydrologique naturel, utilisé dans la démarche de calcul de l'IDPR provient des données de la BD CARTHAGE IGN©. Le réseau théorique des écoulements est fondé sur l'analyse des talwegs. Il s'établit à partir de l'analyse du modèle numérique de terrain (MNT).

Calcul de l'IDPR : L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Cette fonction d'infiltration dépend de la perméabilité verticale qui traduit la capacité d'un sol à laisser passer un fluide. Très variable, ce paramètre dépend essentiellement de la lithologie de la formation considérée.

L'IDPR compare un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène au réseau mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène. Il résulte du rapport, pour tout point de l'espace étudié, entre :

- La distance au plus proche cours d'eau réel,
- La distance au plus proche cours d'eau calculé.

Il varie selon une échelle comprise entre 0 et n. Par souci de simplification du critère, l'IDPR est arbitrairement multiplié par 1000 et limité à 2000.

L'IDPR est inférieur à 1000 quand le réseau théorique n'est pas repris par une rivière réelle. Ce rapport indique alors une infiltration majoritaire des eaux. Inversement, quand le réseau réel est plus dense que le réseau calculé, on est en zone de ruissellement majoritaire, l'IDPR tend vers 2000.

La formule de calcul de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines est la suivante :

$$V_i = (\text{Poids IDPR} * [\text{Critère IDPR}]) + (\text{Poids ZNS} * [\text{Critère ZNS}])$$

Avec : Poids IDPR + Poids ZNS = 1, V_i compris entre 0 et 100

En raison des erreurs toujours possibles de calage des données initiales, l'échelle souhaitable d'exploitation des données cartographiques est dans le cas général l'échelle de 1/100 000.

L'exploitation à une plus grande échelle de restitution (1/50 000 à 1/25 000) n'a pas été expérimentée dans le cadre de cette étude. Il est probable qu'en associant un MNT à un pas de mesure inférieur, de l'ordre de 25 mètres associé à des données géographiques de même précision (à l'exemple de la BD Topo) pourrait conduire à un résultat exploitable dans le cadre d'études sectorielles spécifiques pouvant nécessiter des validations par les hydrogéologues et si besoin des ajustements après contrôles de terrain. De même l'utilisation de cartes piézométriques existantes permettrait d'avoir des grilles plus précises d'épaisseur de la ZNS

2. Méthode DRASTIC

La méthode a été développée par l'EPA⁸ aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. en 1987 afin d'estimer la potentiel des eaux souterraines vis-à-vis de la pollution. La méthode proposée repose sur trois hypothèses de base : (i) les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ; (ii) les contaminants atteignent l'aquifère par le mécanisme d'infiltration efficace et (iii) la nature des contaminants potentiels n'est pas considérée dans le calcul de l'indice. Cette méthode permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur 7 paramètres :

Depth to water (profondeur de la surface piézométrique), **net Recharge** (infiltration efficace), **Aquifer media** (milieu aquifère), **Soil media** (type de sol), **Topography** (pente

⁸ Environmental Protection Agency, USA

du terrain), Impact of the vadose zone (incidence de la zone non saturée) et hydraulic Conductivity (conductivité hydraulique).

Chaque paramètre est cartographié avec un index allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération est ensuite appliqué aux différents paramètres afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des 7 paramètres selon la formule suivante :

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=7} (W_j R_j)$$

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

La méthode propose deux systèmes de pondération suivant l'occupation du sol et les pratiques agricoles : utilisation normale et avec une activité agricole importante (pesticides).

Paramètre	Facteur de pondération "normal"	Facteur de pondération "pesticides"
Depth to water (<i>profondeur de la nappe</i>)	5	5
net Recharge (<i>recharge annuelle</i>)	4	4
Aquifer media (<i>milieu aquifère</i>)	3	3
Soil media (<i>type de sol</i>)	2	5
Topography (<i>pente</i>)	1	3
Impact of the vadose zone (<i>impact de la zone non-saturée</i>)	5	4
hydraulic Conductivity (<i>conductivité hydraulique</i>)	3	2

Illustration 89 – Tableau des facteurs de pondération de la méthode DRASTIC

L'indice de vulnérabilité varie de 1 à 10 pour chacun des paramètres, défini en fonction d'intervalles de valeur. Plus la valeur de l'indice est petit, plus faible est la vulnérabilité à la contamination.

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser les zones à risque: plus l'indice de vulnérabilité est élevé, plus le potentiel de contamination de l'eau souterraine est élevé.

L'identification et l'évaluation des 7 paramètres requièrent la connaissance de la géologie, de l'hydrogéologie, de la pédologie, de la topographie ainsi que de la

météorologie de la zone d'étude. Ces renseignements peuvent être obtenus à partir de la consultation de rapports d'études antérieures, de documents cartographiques (géologiques, pédologiques, ...) ou au sein de bases de données. Une analyse des données disponibles et leur critique vis-à-vis de leur fiabilité sont à effectuer avant l'acquisition de nouvelles données sur le terrain.

Cette méthode est principalement utilisée pour la cartographie à grande échelle (région, état) aux Etats-Unis. Son efficacité reste encore à prouver à cause de ses limites, en effet, cette méthode ne semble pas assez flexible pour s'adapter à des besoins spécifiques. L'index final de vulnérabilité prend en compte un trop grand nombre de paramètres, ce qui implique que l'influence d'un paramètre particulièrement important pour une certaine thématique peut être "masqué" par les autres paramètres pris en compte.

Les intervalles et indices de chacun des paramètres sont présentés dans les tableaux ci-dessous (Aller et al., 1987).

Profondeur de la nappe (en mètres) – « D »	
Intervalle	Valeur de l'indice
0 – 1.5 m	10
1.5 m – 4.5m	9
4.5 m – 9 m	7
9 m à 15m	5
15m à 23m	3
23m à 31m	2
> 31m	1

Illustration 90 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « D »

Pour le cas des nappes captives, la méthode DRASTIC considère que la profondeur de la nappe d'eau correspond à celle du toit de l'aquifère.

La méthode DRASTIC ayant été développée à l'origine aux Etats-Unis, elle s'adresse à des échelles régionales voir nationales, pour lesquelles la variabilité de la recharge peut jouer un rôle important, même si ce paramètre n'est pas intrinsèquement lié au milieu à caractériser.

Recharge annuel (en centimètres) – « R »	
Intervalle	Valeur de l'indice
25 et plus	9
18 à 25	8
10 à 18	6
5 à 10	3
0 à 5	1

Illustration 91 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « R »

Milieu aquifère – « A »	
Intervalle	Valeur de l'indice (valeur de l'indice type)
Calcaire karstique	9- 10 (10)
Basalt	2-10 (9)
Sable et gravier	4-9 (8)
Calcaire massif	4-9 (6)
Grès massif	4-9 (6)
Lits de grès, de calcaire et marnes	5-9 (6)
Formations morainiques	4-6 (5)
Roches ignées ou métamorphiques altérées	3-5 (4)
Roches ignées ou métamorphiques	2-5 (3)
Shistes massifs	1-3 (2)

Illustration 92 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « A »

Type de sol– « S »	
Nature du sol	Valeur de l'indice
Sol mince ou absence de sol	10
Gravier	10
Sable	9
Tourbe	8
Argile fissurée	7
Loam sableux	6
Loam	5
Loam silteux	4
Loam argileux	3
Terre noire	2
Argile	1

Illustration 93 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « S »

Pente du terrain - topographie « T » (en pourcentage)	
Intervalle	Valeur de l'indice
0-2 %	10
2 – 6%	9
6 -12%	5
12-18%	3
> 18%	1

Illustration 94 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « T »

Incidence de la zone vadose – « I »	
Nature de la zone vadose	Valeur de l'indice (valeur type)
Calcaire karstique	8-10 (10)
Basalte	2-10 (9)
Sable et gravier	6-9 (8)
Roches ignées ou métamorphiques	2-8 (4)
Sable et gravier avec silt et argile	4-8 (6)
Bancs de calcaire, de grès et de schistes	4-8 (6)
Grès	4-8 (6)
Calcaire	2-7 (6)
Schistes	2-5 (3)
Silt ou argile	2-6 (3)
Couche imperméable	1 (1)

Illustration 95 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « I »

Dans le cadre de l'application de la méthode DRASTIC, la zone vadose correspond à la portion souterraine du terrain comprise entre le sol (premier mètre à partir de la surface) et le niveau de la nappe d'eau souterraine ; toutes les unités influençant le transport de contaminants sont ainsi prises en considération.

Conductivité hydraulique (en mètres par jour) – « C »	
Intervalle	Valeur de l'indice
82 et plus	10
41-82	8
29-41	6
12-29	4
4-12	2
0,04-4	1

Illustration 96 – Tableau des valeurs de l'indice du paramètre « C »

3. Méthode SINTACS

La méthode SINTACS est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus petite échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie. Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

Soggiacenza (Profondeur à la nappe), **I**nfiltrazione (Infiltration), **A**zione del **N**on Saturo (Fonction de la zone non saturée), **T**ipologia della Copertura (sol), **C**arratteri Idrogeologici dell' **A**cquifero (Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère),

Conducibilità Idraulica (conductivité hydraulique), et Acclività della Superficie Topografica (Pente moyenne de la surface topographique).

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des classes de pondération différentes selon les situations. L'index de vulnérabilité I_v est calculé selon la formule suivante :

$$I_v = \sum P_{(1,7)} W_{(1,n)} \quad \text{Avec : } P_{(1,7)} : \text{index des paramètres 1 à 7}$$

$W_{(1,n)}$: poids correspondant à chaque classe, il varie de 1 à n

Les index résultant de cette méthode sont divisés sous forme de pourcentage et ensuite divisés en intervalles qui ont été définis sur la base de 500 tests, et groupés en six classes de vulnérabilité. SINTACS utilise donc les 7 mêmes paramètres que DRASTIC mais est plus flexible au niveau du système d'indexation et de pondération. L'utilisateur code les données d'entrée de la méthode en fonction des situations locales de chaque cellule avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions.

Les différences principales entre DRASTIC et SINTACS sont les valeurs des indices, la sélection des classes de pondération et la stratégie de leur combinaison.

4. Méthode EPIK

La méthode EPIK a été **développée spécifiquement** pour évaluer la **vulnérabilité des aquifères karstiques** en Suisse dans le but de délimiter des périmètres de protection à partir d'une carte de vulnérabilité (Dörfliger, 1996) pour l'OFEFP⁹. Cette méthode permet de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis à vis de tout type de contaminants.

La méthode EPIK prend en compte 4 paramètres :

Epkarst, **P**rotective Cover (couverture protectrice : sol), **I**nfiltration Conditions (conditions d'infiltration), **K**arst network development (développement de la karstification). Ces critères correspondent à quatre aspects spécifiques de l'organisation des écoulements en milieu karstique. La méthode EPIK permet donc d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines en milieu karstique aux influences naturelles et anthropogènes de manière globale et rigoureuse.

Chaque paramètre est divisé en classes qui traduisent des degrés d'impact vis à vis d'une pollution. Un coefficient multiplicateur (facteur de pondération) est appliqué à chaque paramètre afin de traduire l'importance relative des paramètres les uns par

⁹ Office Fédéral de l'Environnement, la Forêt et le Paysage

rapport aux autres. Sur cette base l'indice final de vulnérabilité est calculé (facteur de protection) selon la formule suivante :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l$$

Avec : $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficients de pondération de chacun des critères
 E_i, P_j, I_k, K_l : valeur de chacun des critères indexés

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des critères indexés de la méthode EPIK, la valeur la plus basse correspondant à la situation la plus vulnérable :

Epikarst			Protective cover				Infiltration conditions				Karst development		
E_1	E_2	E_3	P_1	P_2	P_3	P_4	I_1	I_2	I_3	I_4	K_1	K_2	K_3
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Le tableau ci-dessous récapitule les facteurs de pondération appliqués aux critères de la méthode EPIK, le facteur le plus important est appliqué au critère qui contribue principalement à la valeur du facteur de protection :

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

Illustration 97 – Tableau des facteurs de pondération de la méthode EPIK (Dörfli, 1996)

Le facteur de protection F est calculé en tous points du bassin d'alimentation, plus la valeur du facteur F est élevée, plus le pouvoir de protection est important. Les valeurs de F sont comprises entre 9 et 34, elles sont regroupées en 4 classes de vulnérabilité :

S1 : Vulnérabilité très élevée (F entre 9 et 19)

S2 : Vulnérabilité élevée (F entre 20 et 25)

S3 : Vulnérabilité moyenne (F entre 26 et 34)

Vulnérabilité faible quand $F > 25$ avec des critères tels qu'un sol de faible perméabilité d'une épaisseur supérieure à 8m combiné à des localisations en bas de pente jouant le rôle de collecteur des eaux.

5. Méthode RISKE, RISK

La méthode RISKE a été développée de manière à apprécier la vulnérabilité des aquifères karstiques en se basant sur des critères spécifiques : nature de la Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification et Epikarst. RISKE caractérise uniquement la vulnérabilité à l'infiltration c'est-à-dire la plus ou moins grande facilité qu'aura un polluant de rejoindre la réserve en eau. La migration dans la zone noyée n'est pas prise en compte dans cette méthode.

RISKE est une méthode multicritère à index avec système de pondération; la démarche consiste à identifier les caractéristiques qui définissent un critère, elles sont ensuite divisées en 5 classes (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) :

- Cartographie de chaque critère au 1/25 000^e ou 1/50 000^e suivant les données disponibles : **R**oche aquifère, **I**nfiltration, **S**ol, **K**arstification et **E**pikarst. Chaque critère est subdivisé en classes matérialisées par un indice allant de 0 à 4.
- Discrétisation des cartes ainsi obtenues : la taille de la maille est définie en fonction du pas du **M**odèle **N**umérique de **T**errain de la zone d'étude et des données disponibles.
- 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.
- 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.
- Etape de validation : la carte de vulnérabilité obtenue est confrontée avec les cartes de chaque critère indexé afin de vérifier qu'il n'y a pas d'incohérence flagrante et que certains aspects pouvant localement être essentiels ne se retrouvent pas minimiser voire masqués.

Passage à la méthode RISK

L'évolution ou le passage à la méthode RISK sans prise en considération de l'épikarst s'est faite à partir du constat de la difficulté de prendre en considération la dualité du fonctionnement de l'épikarst dans la cartographie de la vulnérabilité, lors de l'application de la méthode en Franche-Comté et lors de l'établissement d'un guide méthodologique (Dörfliger et al., 2004). L'épikarst peut aussi bien jouer le rôle de protection avec sa fonction de stockage temporaire et donc de retard à l'infiltration, mais peut aussi être « by passé » ; dans ce dernier cas l'épikarst ne joue pas le rôle de protection. Il est de plus, difficile d'identifier facilement la présence de l'épikarst et son type de fonctionnement (protecteur ou non), ainsi que d'identifier sa continuité spatiale. Ainsi dans la méthode RISK, par défaut, les pertes, les avens, les dolines et les vallées sèches sont considérés à différent degré comme des points ou des secteurs d'infiltration et sont intégrés au critère I « conditions d'infiltration ». (Dörfliger et al., 2007).

De plus, dans certaines configurations hydrogéologiques (Grands Causses par ex.), Plagnes et al. (2006) font une interprétation différente du rôle possible de l'épikarst, le considérant comme un facteur protecteur, du fait du rôle de stockage temporaire et de retard dans l'infiltration. Il n'y a pas de standardisation à ce sujet à ce jour.

a) Caractérisation des critères R, I, S, K et E

La démarche consiste à identifier les caractéristiques qui permettent de définir un critère. Elles sont ensuite divisées en 5 classes (indexées de 0 à 4) allant du moins au plus vulnérable. La classe intermédiaire 2 de chaque critère correspond aux caractéristiques moyennement vulnérables. Les 5 critères retenus seront ainsi chacun définis par 5 classes correspondant à une vulnérabilité identique entre critère.

Critère R : Roche

Il caractérise le type de formation qui constitue la roche aquifère (Fig. 1). En effet, la nature des formations géologiques contrôle en partie les circulations d'eau et donc le transfert des polluants potentiels. 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°) 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). Les formations à potentialité aquifère sont classées de la façon suivante :

- **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.

Critère I : Infiltration

Pour déterminer la vulnérabilité des aquifères karstiques, ce n'est pas la quantité d'eau infiltrée qui importe, mais la façon dont elle s'infiltré. Une distinction est ainsi faite entre infiltration diffuse et infiltration lente (Dörfliger, 1996, Dörfliger, 1997). 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. Les classes de pentes retenues sont similaires à celles d'études précédentes (Desprats et al., 1998; Dörfliger, 1996; Suais et al., 1990). 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. L'influence résultante sur la vulnérabilité est donc très faible.

- **I1** : cette classe regroupe les zones où les pentes sont fortes (15-50%) favorisant grandement le ruissellement, l'infiltration étant très faible. L'influence résultante sur la vulnérabilité est donc faible.

- **I2** : cette classe regroupe les zones du bassin où la pente est moyenne (5-15%). La part de ruissellement diminue par rapport à la classe I1 alors que l'infiltration augmente.

- **I3** : cette classe regroupe les zones à pente faible (0-5%) où le ruissellement est limité et l'infiltration beaucoup plus forte. Dans cette classe nous avons aussi inclus les zones cultivées où le sol est travaillé (sillons) perpendiculairement à la pente, et ce quelle que soit la pente de la parcelle cultivée. En effet, le travail des sols favorise très fortement l'infiltration même si la pente est forte. De même, les champs drainés par un système de drainage artificiel sont classés dans cette catégorie.

- **I4** : cette classe est réservée aux manifestations de l'infiltration concentrée qui se produit au niveau des pertes. La vulnérabilité est alors très importante puisque les polluants potentiels s'infiltrent très rapidement et de façon concentrée jusqu'à l'aquifère. Ne sont retenues dans la classification "perte" que les pertes situées sur un cours d'eau temporaire ou non, les autres cavités abusivement appelées pertes par les spéléologues sont classées en tant qu'aven. Aux pertes elles-mêmes, il faut ajouter les cours d'eau qui les alimentent ainsi que leur bassin versant associé. Un polluant déversé en une zone quelconque du bassin d'alimentation d'une perte atteindra forcément la perte avec un décalage temporel plus ou moins important.

Critère S : Sol

Les formations pédologiques forment une couverture protectrice au-dessus des roches aquifères. Il est donc important d'évaluer le pouvoir protecteur et/ou régulateur de ces horizons vis à vis du transfert de polluants potentiels. D'une manière générale, les sols ne sont pas très développés en région karstique et le critère S peut dans certains cas ne pas être pris en compte. Même si l'on ne dispose que de peu d'information sur les sols, le paramètre le plus facilement accessible est l'épaisseur, soit à partir des cartes de sol de type INRA ou directement par des mesures à la tarière à main sur le terrain. Les photos aériennes et images satellites locales peuvent part ailleurs constituer une bonne source d'information en complément des cartes géologiques et des rapports d'étude ou thèses régionaux.

Dans l'analyse du critère R, il a été précisé qu'une partie des roches affleurantes peut être considérée comme ayant un pouvoir protecteur important vis à vis des roches aquifères (argiles, argiles marneuses, conglomérats et brèches massives principalement).

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. Ces deux paramètres ont été croisés pour déterminer la nature du sol qui est ensuite croisée 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. Une classe supplémentaire a été ajoutée lorsqu'un horizon géologique protecteur de faible conductivité hydraulique et d'épaisseur significative (argiles, argiles marneuses, conglomérats et brèches massifs) est présent en plus des horizons de sol. La description des 5 classes du critère Sol est donnée dans le tableau ci-dessous.

		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

Critère K : Karstification

S'il est l'un des critères fondamentaux conditionnant la vulnérabilité, la karstification du milieu est aussi l'un des plus difficiles à quantifier même de manière semi-quantitative. La méthode d'analyse des hydrogrammes de Mangin (1975) qui est souvent utilisée n'est pas appropriée puisqu'elle prend en compte, en plus de la karstification de la zone d'infiltration, l'inertie du système liée aux réserves en eau de la zone noyée (cf. § 2.3).

Dans ces conditions les seules façons de déterminer le degré de karstification dans la zone d'infiltration semblent être :

- Une approche basée sur des observations de type spéléologique, la présence de grottes et d'avens constituant un bon indice de karstification, ainsi que les réseaux spéléologiques (actifs ou fossiles);
- Les traçages, pouvant aussi permettre d'identifier la présence ou non d'un karst actif. A titre indicatif, une vitesse de cheminement du traceur entre une perte et l'exutoire supérieure à 15 m/h en basses eaux et 75 m/h en hautes eaux permet d'admettre l'existence d'un réseau karstique (Dörfliger, 1996). La classification retenue pour le critère K est la suivante :
 - **K0** : aquifère peu ou pas fissuré.
 - **K1** : aquifère fissuré mais non karstifié.
 - **K2** : réseau mal karstifié ou avec de mauvaises connections avec la surface.
 - **K3** : 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** : Réseau karstique bien développé, présence d'un gros collecteur connecté avec la surface. Traçage(s) à circulation rapide.

Critère E : Epikarst

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 aussi jouer le rôle de réservoir temporaire après les périodes de précipitations. 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 de ses manifestations de surface (avens, grottes, lapiez, dolines, ...). Ces objets géomorphologiques peuvent être identifiés à partir des cartes IGN au 1/25 000° ou encore plus détaillée. L'utilisation des photos aériennes est aussi recommandée en particulier pour l'identification des zones de lapiez. Les différents objets géomorphologiques liés à l'épikarst peuvent être classés de la façon suivante en fonction de leur influence sur la vulnérabilité des aquifères :

- **E0** : cette classe concerne les bassins qui ne présentent pas de modelé karstique identifié.
- **E1** : cette classe regroupe toutes les zones du bassin qui ne présentent pas de modelé karstique net, lorsqu'on peut par ailleurs observer des morphologies de type doline ou lapiez.

- **E2** : cette classe regroupe les morphologies karstiques de type lapiez et les vallées sèches avec leur bassin versant associé. Ce type de morphologies, bien que n'étant pas en relation directe avec le réservoir aquifère, peuvent concentrer les écoulements qui finiront par s'infiltrer avec un délai plus ou moins important.
- **E3** : cette classe prend en compte les dolines et les alignements de dolines (ouvalas) qui constituent des zones dépressionnaires concentrant les écoulements qui rejoindront ensuite le réservoir aquifère par infiltration plus ou moins différée dans le temps. Les dolines sont cartographiées en définissant une zone de "sécurité" de 50 m autour.
- **E4** : cette classe prend en compte les avens qui peuvent, de par leur structure verticale, constituer des points d'entrée privilégiés de polluants vers le réservoir. Comme pour les dolines, une zone de sécurité de 50 m a été définie autour des avens. Les grottes n'ont pas été retenues car elles présentent des développements horizontaux d'une profondeur limitée qui n'influencent que peu ou pas la vulnérabilité.

Les classes des 5 critères RISKE avec leur indice de vulnérabilité sont synthétisées dans le tableau 5.

Calcul de l'indice global de vulnérabilité

La combinaison des 5 cartes correspondant à la transcription des 5 critères RISKE permet de calculer l'indice global de vulnérabilité (I_g) en chaque maille de la zone d'étude. Le choix de la taille de la maille se fait généralement en fonction du pas du Modèle Numérique de Terrain (50 x 50m par exemple) ou de la densité de l'information disponible. A chaque maille correspond une valeur de l'indice de chacun des critères (Tab. 5). La compilation des 5 cartes élémentaires se fait en introduisant un facteur de pondération entre les critères traduisant l'importance relative qui leur est attribuée. Cette étape est largement facilitée par l'utilisation d'un Système d'Information Géographique. Dans le cadre de la méthode RISKE, le logiciel IDRISI® v32.02 (Clark-Labs, 2000) pour Windows sous PC a été retenu pour ses grandes capacités et sa facilité d'utilisation. D'autres logiciels tels que « Verticalmapper » sous Mapinfo peuvent également être utilisés. Le calcul de l'indice global de vulnérabilité I_g se fait selon la formule :

$$I_g = \alpha R_i + \beta I_j + \delta S_k + \gamma K_l + \varepsilon E_m \quad (3)$$

$\alpha, \beta, \delta, \gamma, \varepsilon$:: Poids des critères RISKE

i, j, k, l, m : Indices des critères RISKE.

La pondération entre les critères est établie suivant la méthode mathématique qui consiste à comparer les critères deux à deux à partir d'une échelle continue d'index (Tab. 6) (Saaty, 1977). Un indice de cohérence de la matrice est calculé indiquant la probabilité pour que les index aient été affectés au hasard, dans ce cas il est nécessaire de réévaluer toute la matrice. Les résultats sont présentés dans le tableau 7, les poids arrondis sont utilisés dans l'équation 3. L'indice global de vulnérabilité est

compris entre 0 et 4, correspondant respectivement à la configuration de terrain la moins vulnérable et la plus vulnérable :

- 0 correspond à R0, I0, S0, K0, E0, c'est à dire à une roche marneuse peu ou pas fissurée, recouverte d'un horizon géologique de faible conductivité hydraulique de plus de 5 m, sans modelé karstique de surface identifié avec des pentes supérieures à 50%.

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

Critères		Caractéristiques								Index	Poids	
R	Roche aquifère	R ₀	Marnes								0	0.1
		R ₁	Marno-calcaires								1	
		R ₂	Calcaires marneux								2	
		R ₃	Calcaires et dolomies massifs en gros bancs non fracturés, Calcaires en petits bancs avec fracturation homogène								3	
		R ₄	Calcaires en gros bancs massifs fracturés								4	
I	Infiltration	I ₀	Pente très forte > 50%								0	0.4
		I ₁	Pente forte (15 et 50%)								1	
		I ₂	Pente moyenne (5 et 15%)								2	
		I ₃	Pente faible (0-5%), zones cultivées (sol travaillé perpendiculairement à la pente)								3	
		I ₄	Bassin versant alimentant une perte								4	
S	Sol (Horizon protecteur)	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 de sol iconnue	Nature * de sol connue			Nature de sol iconnue	Nature * de sol connue					
			1	2	3		1	2	3			
		S ₀	-	-	-	-	Couverture protectrice >5m (avec sol ou non)				0	
		S ₁	Epaisseur >100 cm	Epaisseur >100 cm	-	-	Couverture protectrice 1-5m ou <1m avec un sol de texture inconnue ou de type 1 >20cm				1	
		S ₂	Epaisseur 20-100 cm	Epaisseur 20-100 cm	Epaisseur >100 cm	-	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 20-100 cm	-	2	
		S ₃	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 20-100 cm	Epaisseur >100 cm	Absence totale de sol	Absence totale de sol	Epaisseur 20-100 cm	Epaisseur 0-100 cm	3	
S ₄	Absence totale de sol	Absence totale de sol	Epaisseur 0-20 cm	Epaisseur 0-100 cm	-	-	-	-	4			
K	Karstification	K ₀	Aquifère peu ou pas fissuré								0	0.2
		K ₁	Aquifère fissuré mais non karstifié								1	
		K ₂	Réseau mal karstifié ou mauvaise connection avec la surface								2	
		K ₃	Réseau karstique bien développé, présence d'un drain collecteur de petite taille connu (ou présumée d'un gros) connecté avec la surface. Traçage à circulation rapide								3	
		K ₄	Réseau karstique bien développé, présence d'un gros collecteur connecté avec la surface. Traçage à circulation rapide								4	
E	Epikarst	E ₀	Zone sans modelé karstique identifié								0	0.2
		E ₁	Zone sans modelé karstique net								1	
		E ₂	Lapiez, vallées sèches (+ bassin versant les alimentant)								2	
		E ₃	Dolines et ouvalas								3	
		E ₄	Avens								4	

* Nature des sols : c.f. tableaux 3 et 4

Illustration 98 – Tableau récapitulatif des différents paramètres et pondération de la méthode RISKE (Pételet-Giraud et al. 2001)

- 4 correspond à R4, I4, S4, K 4, E4, soit à une matrice de calcaires en gros bancs fortement karstifiée (présence d'un gros collecteur connecté à la surface), avec la présence de pertes et d'avens, une absence totale de couverture protectrice (ou jusqu'à 1 m de sol sableux avec une forte proportion de cailloux).

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrême-ment	Très fortement	Fortement	Moyenne-ment	Egal	Moyenne-ment	Fortement	Très fortement	Extrême-ment
Moins important				Plus important				

Matrice de comparaison A par rapport à B

B →		R	I	S	K	E
A ↓	R	1				
	I	3	1			
	S	1	1/3	1		
	K	3	1/3	3	1	
	E	3	1/3	3	1	1

Illustration 99 – Méthode de hiérarchisation entre critères (Saaty et al., 1977), application à la méthode RISKE (Pételet-Giraud et al., 2001).

Comme nous l'avons vu précédemment, les critères doivent être les plus indépendants possibles et en nombre minimum pour éviter les redondances. Si les trois critères de structure (Sol, Epikarst et Roche) sont à priori indépendants, en réalité le développement de l'épikarst est lié aux deux autres (Sol et Roche). D'autre part, il y a forcément des interactions entre la structure et le fonctionnement, il est donc nécessaire de tester l'interdépendance des critères. En théorie, à l'issue de ce test, le système de pondération devrait être adapté au résultat pour ne pas attribuer un poids trop important à un critère fortement dépendant des autres car celui-ci aurait alors virtuellement un poids encore plus important.

Le tableau 8 présente la matrice d'interdépendance des critères. Il en résulte que le critère le plus dépendant des autres est l'infiltration (I), suivi de la karstification (K) et l'Epikarst (E), puis du sol (S) et enfin de la Roche (R) qui est complètement indépendant. Le critère infiltration étant très fortement lié à la karstification et à l'épikarst, on pourrait remettre en question la pertinence de ce critère puisqu'il est inclus dans les deux autres. Il n'est toutefois pas envisageable de le supprimer puisque c'est l'infiltration de l'eau qui conditionne à la fois la structure et le fonctionnement de l'aquifère et donc le transfert des polluants dans le réservoir. De plus, on occulterait alors deux aspects fondamentaux que sont le rôle joué par les pertes et la topographie. L'infiltration jouant le rôle primordial en terme de vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques, il est logique que lui soit attribué le poids le plus fort dans le système de pondération.

Identification des classes de vulnérabilité

Toutes les alternatives des critères sont classées en 5 catégories indexées de 0 à 4, du moins au plus vulnérable (la classe intermédiaire 2 correspondant aux caractéristiques moyennement vulnérables de chaque critère). Dans la même logique, l'indice global de vulnérabilité (I_g) obtenu en chaque pixel de la zone d'étude est divisé en 5 classes égales (0 à 4) allant du moins au plus vulnérable (Tab. 9). La carte finale de vulnérabilité représente donc les zones appartenant à une même classe de vulnérabilité par le même code couleur : très faible (bleu ciel), faible (vert clair), moyenne (jaune), forte (orange) et très forte (rouge). Le choix des couleurs est dans le même esprit que celles préconisées par Adams et al. (1994).

	R	I	S	K	E	Somme
Poids Arrondi	0.1	0.4	0.1	0.2	0.2	1

Illustration 100 – Poids relatifs attribués aux critères R, I, S, K et E

Critères		Caractéristiques		Indice
R	Nature de la roche aquifère	R0	Marnes (35-65% de minéraux argileux) – faible propriétés aquifères.	0
		R1	Marnes- calcaires (25-35% de minéraux argileux) – faible écoulement souterrain.	1
		R2	Calcaire avec marnes en interbancs, % minéraux argileux < 10-25%.	2
		R3	Calcaire massif et/ou dolomites avec bancs épais sans fractures, calcaires en bancs minces avec fractures (fracturation homogène), écoulement souterrain facile et rapide.	3
		R4	Calcaire massif et/ou dolomites avec une forte intensité de fracturation et de karstification), écoulement souterrain facile et rapide, contamination rapide.	4
I	Infiltration	I0	Très forte pente > 50%	0
		I1	Forte pente (15-50%)	1
		I2	Pente modérée (5-15%) et vallées sèches	2
		I3	Faible pente (0-5%), zones cultivées perpendiculaires, dolines	3
		I4	Pertes et bassin versant des pertes actives	4
S	Sol	Détail du tableau dans le tableau 2		0 à 4
K	Karstification	K0	Aquifère plus ou moins fissuré	0
		K1	Aquifère fissuré mais sans karstification	1
		K2	Réseau karstique peu développé ou mal connecté avec la surface	2
		K3	Réseau karstique bien développé, présence de drains collecteurs de petite taille reconnus et connectés à la surface. Essais de traçage avec vitesse élevée.	3
		K4	Réseau karstique très bien développé, présence de drains collecteurs de grande taille, bien connectés à la surface. Essais de traçage avec vitesse élevée.	4

Illustration 101 – Tableau récapitulatif des critères et indice de la méthode RISK (Dörfliiger et al., 2004)

6. Méthode RISKE « modifiée »

Cette méthode a été développée à partir des travaux des étudiants de Valérie Plagnes, (Maître de conférences, UMR Sysiphe, Université de Paris VI)

Les modifications majeures de la méthode RISKE « modifiée » par rapport à la méthode RISKE ou RISK, reposent dans la définition de certains critères :

- le critère Infiltration est défini à partir des pentes, intègre également tout comme dans la méthode RISK, 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 unaire et binaire sont intégrées dans la définition du critère Karstification, de façon à pouvoir mieux comparer des systèmes karstiques entre eux.

La description des critères est donnée dans le tableau ci-dessous :

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

Critères		Description	Indice
Nature de la roche aquifère	R0	Marnes (35 - 65% de minéraux argileux) - faible propriétés aquifères	0
	R1	Marnes - calcaires (25-35% de minéraux argileux) - faible écoulement souterrain	1
	R2	Calcaires avec marnes en interbancs, % minéraux argileux < 10-25%	2
	R3	Calcaire massif et/ou dolomites avec bancs épais sans fractures, calcaires en petits bancs avec des intercalations argilo-marneuses et affectés par une fracturation homogène, écoulement souterrain facile et rapide	3
	R4	Calcaire massif et/ou dolomites avec une forte intensité de fracturation et de karstification, écoulement souterrain facile et rapide, contamination rapide	4
Infiltration	I0	terrains non calcaires ne permettant pas l'infiltration et/ou zones à fortes pentes (> 50%) induisant un ruissellement de l'eau très important et une infiltration négligeable voire même nulle.	0
	I1	absence de morphologie karstique sur terrains calcaires et/ou zones où les pentes sont comprises entre 15 et 50%, favorisant grandement le ruissellement, l'infiltration étant très faible	1
	I2	zones de pente moyenne (5-15%) permettant une infiltration lente et/ou zone où le ruissellement est limité en terrains carbonatés, ex. vallées sèches	2
	I3	Zones avec dolines et dépressions de type poljés, alignement de dolines et/ou zones à faibles pentes (0-5%) où le ruissellement est limité et l'infiltration est favorisée.	3
	I4	Pertes actives au niveau de gouffres, avens et leur bassins versants associés	4
Sol	S	idem définition pour critère S de la méthode RISKE et RISK	0-4
Epikarst	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	0
	E1	épikarst moins épais (50 cm à 1m), plus ou moins continu latéralement, pouvant stocker temporairement de l'eau à proximité de la surface.	1
	E2	épikarst peu épais (2à à 50cm), moyennement développé et discontinu, avec une capacité de stockage en surface moyenne	2
	E3	épikarst peu épais (> 20cm) ou absent localement, discontinu et peu développé, avec une faible possibilité de stockage temporaire	3
	E4	pas d'épikarst, donc aucune possibilité de stockage temporaire en sub-surface	4
Karstification	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	0
	K1	karst unaire peu/moyennement fonctionnel avec des vitesses de traçage artificiel lentes et des temps de séjour longs	1
	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	2
	K3	karst binaire peu/moyennement fonctionnel	3
	K4	karst binaire très fonctionnel	4

Une des différences majeures avec la méthode RISK(E) est 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. 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

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

		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

Cette méthode modifiée a été testée et développée sur deux bassins d'alimentation de sources du Causse du Larzac (Esperelle et Durzon) (travaux de maîtrise des Sciences de la Terre, Université Pierre et Marie Curie, 2003 et 2004 sous la direction de Valérie Plagnes et Sylvain Thery).

7. Méthode COP

Le laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université de Malaga (Espagne) a développé cette méthode dans le cadre de l'action COST 620. Cette méthode utilise les paramètres suivants :

C – concentration du flux, qui fait la distinction entre une recharge au travers de pertes (scenario A) et le reste du bassin d'alimentation (scenario B)

O – la couverture protectrice située au dessus de l'aquifère, constituée par le sol et les autres formations lithologiques

P – précipitation en considérant la quantité et l'intensité des précipitations à l'échelle du bassin d'alimentation considéré

L'index "COP" est obtenu à l'aide de l'équation suivante:

$$\text{Index "COP"} = (\text{valeur de C}) * (\text{valeur de O}) * (\text{valeur de P})$$

Index « COP »	Classes de vulnérabilité
[0-0.5]	Très élevée
[0.5-1]	Elevée
[1-2]	Modérée
[2-4]	Faible
[4-15]	Très faible

Illustration 102 - Index "COP" pour la cartographie de la vulnérabilité (Vias et al., 2002)

La concentration du flux "C" résulte soit de la valeur du scénario A ou du scénario B. L'index C pour le scénario A est égal à la distance avec la perte (dh) multipliée par la pente ainsi qu'à la valeur concernant l'occupation par la végétation (sv) multipliée par la distance jusqu'au cours d'eau qui s'infiltré au niveau de la perte (ds). La valeur de l'index C est comprise entre 0 et 1, correspondant à une valeur très élevée de protection respectivement à une valeur très faible vis-à-vis de la protection.

Les différentes composantes de l'index C, O et P sont données en annexe 4.

La méthode "COP" tout comme la méthode "PI" présentée ci-dessous, intègre le facteur précipitation. Les paramètres nécessaires pour caractériser les différents indices sont facilement accessibles et la méthode est facile à mettre en œuvre. A cause du nombre importants de calculs à effectuer, comme pour les autres méthodes

de cartographie de la vulnérabilité, l'utilisation d'un système d'information géographique est indispensable.

L'attribution de valeur spécifique pour les différents paramètres n'est pas donnée de manière explicite; elle est basée sur l'expérience. Il n'est pas évident de comprendre pourquoi la valeur de l'indice O_L pour la lithologie varie entre 1500 et 1 ; l'amplitude de variation est importante.

Distance jusqu'à la perte (m)	Valeur « dh »	Pente	Végétation	Valeur « sv »	Distance au cours d'eau qui se perd	Valeur « ds »
>= 500m	0	<=8%	-	1	< 10m	0
[500-1000]	0.1	8-31%	Oui	0.95	10-100m	0.5
[1000-1500]	0.2	8-31%	Non	0.9	> 100m	1*
[1500-2000]	0.3	31-76%	Oui	0.85		
[2000-2500]	0.4	31-76%	Non	0.8	* aussi 1 s'il n'y a pas de cours d'eau qui se perd au sein du bassin d'alimentation considéré	
[2500-3000]	0.5	>76%	-	0.75		
[3000-3500]	0.6					
[3500-4000]	0.7					
[4000-4500]	0.8					
[4500-5000]	0.9					
> 5000	1.0					

Illustration 103 - Composantes de l'indice C "flux de concentration" pour calculer l'index C pour le scénario A ; Valeur de $C = (dh)*(ds)*(sv)$ (Vias et al., 2002)

	Formations lithologiques de surface			Pente	Végétation	Valeur
<u>Phénomènes karstiques</u>	Absence	Perméable	Imperméable	<=8%	-	0.75
Karst développé	0.25	0.5	0.75	8-31%	Oui	0.8

Peu développé ou présence de phénomènes de dissolution	0.5	0.75	1		8-31%	Non	0.85
Karst fissuré	0.75	0.75	1		31-76%	Oui	0.9
Absence de phénomènes karstiques	1	1	1		31-76%	Non	0.95
					> 76%	-	1
	Sf						Sv

Illustration 104 - Composants de l'index C pour le scénario B: Valeur de C= (sf) * (sv) (Vias et al., 2002)

La carte résultante pour l'indice C est caractérisée par des valeurs correspondant à une réduction élevée ou faible de la protection de la ressource en eaux souterraines; les valeurs de l'indice C ainsi que le caractère de réduction de protection correspondant sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Valeur de C	Réduction de la protection
[0-0.2]	Très élevé
[0.2-0.4]	Elevé
[0.4-0.6]	Modérée
[0.6-0.8]	Faible
[0.8-1.0]	Très faible

Illustration 105 - Valeurs de C score et réduction de protection (Vias et al., 2002)

Concernant la détermination de l'indice O, la valeur de l'indice O est égal à [Os] + [OL]. Os résulte de la combinaison de la structure et de la texture du sol comme suit:

Epaisseur (m)	Structure/Texture			
	Argileux	Silteux	Loess	Sableux

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

	> 30% argile	> 70% Silt	Le reste	> 70% sable + <=15% argile
> 1.0m	5	4	3	2
0.5-1.0m	4	3	2	1
< 0.5m	3	2	1	0*

* aussi lorsqu'il n'y a pas de sol

Illustration 106 - Valeur de Os (Vias et al., 2002)

L'indice OL est fonction de la lithologie et de l'épaisseur de chaque formation lithologique reposant au-dessus de l'aquifère. De manière optionnelle, l'indice peut être multiplié par une valeur décrivant les conditions de captivité de l'aquifère: captif (*2), semi-captif (* 1.5) and libre (*1).

Lithologie et fracturation	Valeur type de lithologie	Indice Formation lithologique (Valeur Lithologie * épaisseur (m))	Valeur résultante OL
Argiles	1500	[0-250]	1
Silts	1200	[250-1000]	2
Marnes et métapélites non fissurées et roches ignées	1000	[1000-2500]	3
Calcaires marneux	500	[2500-10000]	4
Métapélites fissurées et roches ignées	400	[> 10000]	5
Cemented or non fissured	100		
Grès	60		
Conglomérats et brèches faibles cimentés et fissurés	40		

Illustration 107 - Valeur de l'indice OL (Vias et al., 2002)

La carte de l'indice O résultante comprend plusieurs valeurs, classées selon des valeurs de protection différentes, de très haute à très faible :

Valeur de O	Valeur de protection
1	Très faible
2	Faible
[2-4]	Modérée
[4-8]	Haute
[8-15]	Très haute

Illustration 108 - Valeur de O et valeur de protection concernant le sol et les formations lithologiques (Vias et al., 2002)

Le facteur P (précipitation) est un indice optionnel ; il peut être utilisé lorsque l'objectif est d'effectuer la cartographie de la vulnérabilité de plusieurs bassins d'alimentation ou d'aquifères, avec pour objectif une comparaison de la vulnérabilité entre les différents aquifères et spécialement s'il y a une grande variabilité spatiale des précipitations sur la zone d'étude considérée. Ce facteur n'est pas un facteur intrinsèque au milieu aquifère.

8. Méthode PI

Cette méthode a été développée dans le cadre de l'action COST620 et cofinancée par le BGR (Goldscheider, 2000), à l'université de Karlsruhe (Allemagne). Cette méthode a été appliquée à 12 systèmes karstiques dans 7 pays européens. Le concept général est le suivant: c'est une méthode orientée Système d'Information Géographique, qui est basée sur le **concept « origine-écoulement-cible »** ; la cible est la surface piézométrique et non la source ou le captage. **C'est une méthode de caractérisation de la vulnérabilité de la ressource et non du captage de la source.**

Cette méthode repose essentiellement sur la caractérisation spatiale de deux critères: P pour la couverture Protectrice et I pour les conditions d'infiltration. Le premier critère P est subdivisé en 5 classes, de 1 pour un faible degré de protection à 5 pour un fort degré de protection. La détermination des classes de ce critère repose sur une méthode développée par Hötling en Allemagne.

Le résultat de P peut être classé en 5 classes de vulnérabilité comme il est exprimé dans le tableau ci-dessous (Hötling et al., 1995) :

Résultat P	Efficacité de la protection	P-facteur
0-10	Très bas	1
> 10 – 100	Bas	2
> 100 – 1000	Modérée	3
> 1000 – 10 000	Elevée	4
> 10 000	Très élevée	5

Illustration 109 - Classes de vulnérabilité de la méthode PI.

La méthode d'Höltling est une méthode intégratrice ; elle détermine une valeur d'indice pour 5 classes différentes, en considérant d'une part l'épaisseur des formations, la nature du sol sensu stricto, la recharge (quantité en mm), la lithologie et l'intensité de fracturation.

Le critère I caractérise les conditions **d'infiltration** : la valeur de I est comprise entre 1 et 0, avec I = 1 correspondant à une infiltration diffuse, $0 < I < 1$ pour des écoulements latéraux de surface et de subsurface, et I = 0 correspond à une infiltration ponctuelle.

La caractérisation repose sur la prise en compte de concepts hydrologiques tels que l'existence d'écoulement latéral, d'écoulement Hortonien et d'écoulement préférentiel via une perte ou un gouffre.

Le **Facteur de protection** Π résultant est la multiplication de l'indice des critères P et I, soit $P * I$; $\Pi > 1$ signifie un degré de protection très faible, une vulnérabilité extrême à la pollution ; $\Pi = 5$ signifie un fort degré de protection et une très faible vulnérabilité (Illustration 110).

	Carte de vulnérabilité		Carte P		Carte I	
	Description	π - facteur	Description	P - facteur	Description	I- facteur
Rouge	Extrême	0 – 1	Très faible	1	Très élevée	0.0 – 0.02
Orange	Haute	> 1 – 2	Faible	2	Elevée	0.4
Jaune	Modérée	> 2 - 3	Modérée	3	Modérée	0.6
Vert	Faible	> 3 – 4	Elevée	4	Faible	0.8
Bleu	Très faible	> 4 – 5	Très élevée	5	Très faible	1.0

Illustration 110 - Légende de la carte de vulnérabilité de la méthode PI (COST 620).

La fonction « de totale protection » est calculée comme suit :

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

$$P = [T + (\sum S * M + \sum B * M)] * R + A$$

Le tableau ci-après explicite les critères et classes utilisés pour caractériser le paramètre P.

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

T - Sol superficiel

eFC[mm] jusqu'à 1 m épaisseur	T
> 250	750
> 200 - 250	500
> 140 - 200	250
> 90 - 140	125
> 50 - 90	50
< 50	0

Recharge - R

Recharge [mm/an]	
0 - 100	1.75
> 100 - 200	1.50
> 200 - 300	1.25
> 300 - 400	1.00
> 400	0.75

S - Sous-sol	S
Type de sous-sol (distribution de la taille des grains)	
Argile	500
Argile, faiblement silteuse	400
Faiblement argilo-sableux	350
Silteux-argileux, limoneux argileux	320
Limoneux argileux	300
Argileux silteux, argileux sableux	270
Silteux limoneux	250
Faiblement argilo-limoneux, argilo-silteux -limoneux	240
Très limoneux silteux, limono-silteux	220
Très argilo-sableux, sablo-silto-limoneux, faiblement sablo-limoneux, limoneux silteux, argilo-silteux	200
Limoneux sableux, faiblement limoneux silteux	180
Faiblement argilo-silteux, sablo-limono-silteux, silt, très sablo-limoneux	160

S - Sous-sol	S
Type de sous-sol (distribution de la taille des grains)	
Très argilo-sableux, argilo-sableux, limoneux-silteux-sableux	140
Sablo-silteux, très limono-sableux	120
Limono-sableux, très silto-sableux	90
Sableux faiblement argileux, sable silteux, gravier et sable argileux	75
Sable faiblement limoneux, gravier sablo-silteux	60
Sable faiblement silteux, sable faiblement silteux avec graviers	50
Sable	25
Sable avec graviers, gravelo-sableux	10
Graviers, graviers avec brèches	5
Matériel volcanique non consolidé (pyroclastique)	200
Tourbe	400
Sapropèle	300

Lithologie - L

Lithologie	L
Argiles, marnes, silts	20
Grès, quartzite, roche volcanique, plutonite, métamorphites	15
Grès poreux, roche volcanique poreuse	10
Conglomérat, brèches, calcaire, roche dolomitique, roche gypsifère	5

Fracturation - F

Fracturation	F
Non jointifs	25
Faiblement jointifs	4
Faiblement karstifié, phénomènes karstiques colmatés	1
Karstifié modéré ou phénomènes karstiques non colmatés	0.5
Fortement fracturé ou fortement karstifié et non colmaté	0.3
Epikarst développé, non colmaté	0
Non connu	1

Epaisseur de chaque strate (m) - M

Roche aquifère - B
B= L * F

Pression artésienne - A
1500 points

Illustration 111 - Détermination du critère P de la méthode PI, d'après la méthode d'Höltling (1995).

9. Méthode LEA (approche européenne)

Cette méthode est basée sur deux facteurs, à savoir la **couverture protectrice et les conditions d'infiltration**, donnant un cadre plutôt que des schémas d'évaluation de la vulnérabilité. Une des différences avec la méthode PI, est qu'elle n'a pas recours à l'usage d'indice numérique (Illustration 112).

Couverture protectrice	Vulnérabilité	Temps de transfert estimé
Roche calcaire karstique dénudée ou sol très fin, pelliculaire	Extrême	Instantanée – quelques heures
Sol, dépôt < 3 m épaisseur	Très élevée	Quelques heures, < 1 jour
Limons 1-3m épaisseur, dépôts fins	Elevée	Jours - < 1 mois
Argiles > 1m, limons > 4m	Modérée	> 1 mois
Argiles > 2m, limons > 40m	Faible	> 1 an
Argiles > 12m épaisseur	Très faible	10 ans

Illustration 112- Couverture protectrice liée à la vulnérabilité et classe de temps de transit estimatif (COST 620).

10. Méthode « DISCO » pour les aquifères fissurés

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 s'insère dans une procédure méthodologique plus générale de délimitation des périmètres de protection en milieu fissuré. La démarche peut être résumée dans la figure ci-dessous :

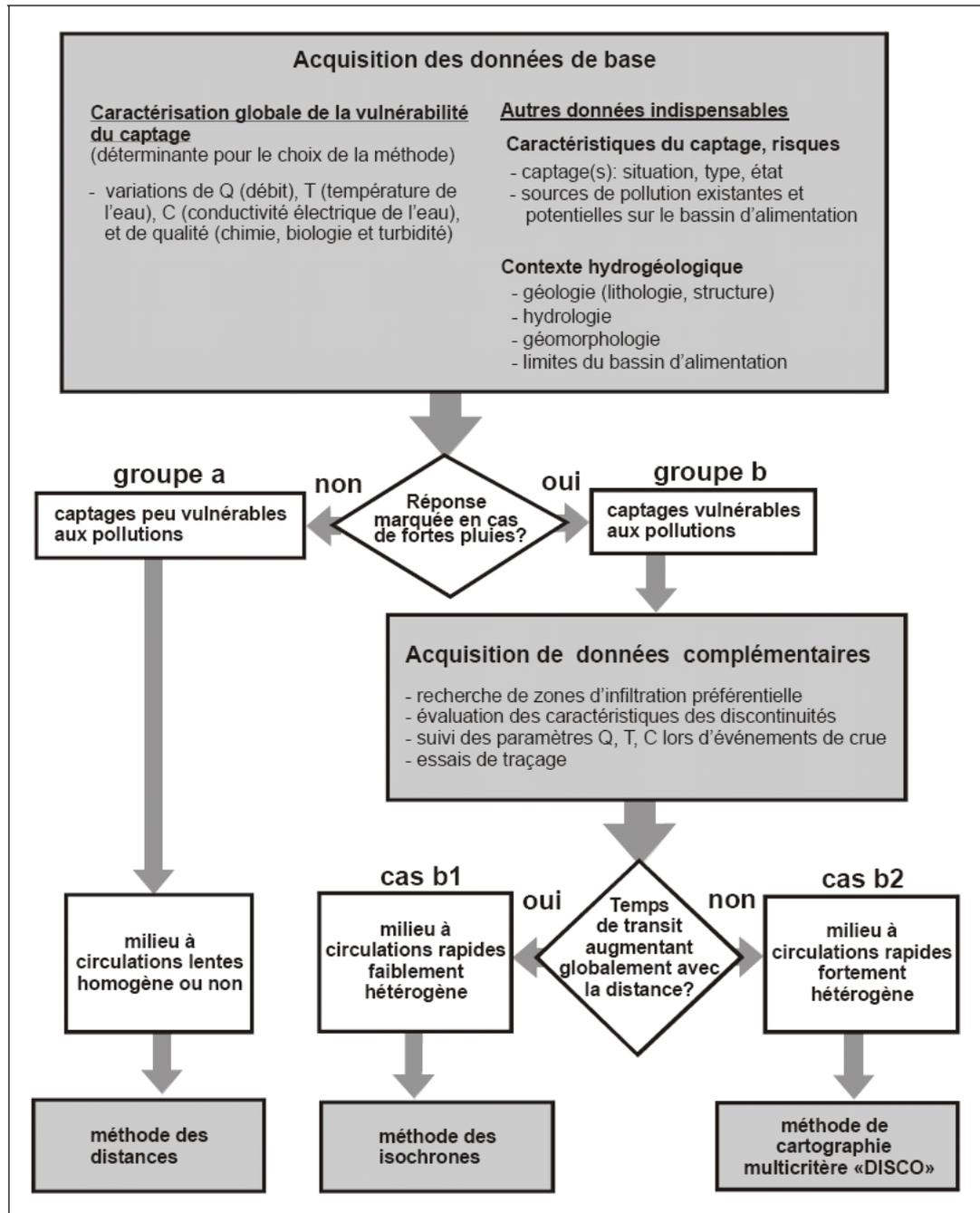


Illustration 113 – Démarche méthodologique pour la délimitation des périmètres de protection en milieu fissuré selon Pochon & Zwahlen, 2003.

Dans le cas d'aquifères fissurés hautement hétérogènes, la méthode « DISCO » est appliquée ; elle repose sur deux à 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** qui a pour effet de retarder ou de déplacer l'effet protecteur du sol et des couches géologiques au dessus de l'aquifère
- **Ruissellement** comprenant tous les processus à la surface avant l'infiltration

Evaluation du paramètre « discontinuité »

Classe	Valeur	Evaluation du critère
D0	0	Discontinuité connectée de manière rapide au captage (environ 10 heures), pas de phénomène d'atténuation significatif
D1	1	Discontinuité bien connectée au captage (quelques jours), phénomène d'atténuation limité
D2	2	Faible et lente connexion hydraulique au captage (environ 10 jours), phénomène d'atténuation efficace: zones de conductivité hydraulique moyenne ou discontinuité sans connexion hydrauliques rapide au captage.
D3	3	Connexion hydraulique lente au captage (plusieurs dizaines de jours), phénomène d'atténuation très efficace: zones ou surfaces caractérisées par de faible conductivité hydraulique

Evaluation de la « couverture protectrice »

a) sol			
Epaisseur (m)	Sol très perméable (sable, blocs)	Sol de perméabilité moyenne (silt, limon)	Sol de faible perméabilité (limon, argile)
0 - 0.2	P0 = 0	P0 = 0	P0 = 0
0.2 – 0.5	P0 = 0	P0 = 0	P1 = 1
0.5 – 1.00	P0 = 0	P1 = 1	P2 = 2
> 1.00	P1 = 1	P1 = 1	P3 = 3

b) présence de formations géologiques, consolidées ou meubles, de faible conductivité hydrauliques (argiles, silts, marnes)

Epaisseur (m)	Combiné avec sol P0	Combiné avec sol P1	Combiné avec sol P2	Combiné avec sol P3
< 1m	P1 = 1	P2 = 2	P3 = 3	P3 = 3
1 – 2 m	P2 = 2	P3 = 3	P3 = 3	P4 = 4
> 2m	P3 = 3	P3 = 3	P4 = 4	P4 = 4

Facteur de protection intermédiaire Fint

	P0	P1	P2	P3	P4
D0	0	1	2	3	4
D1	2	3	4	5	6
D2	4	5	6	7	8
D3	6	7	8	9	10

Valeur	Fint = 0, 1	Fint = 2, 3, 4	Fint = 5, 6, 7	Fint = 8, 9, 10
Protection	Très faible	Faible	Modérée	Elevée
Vulnérabilité	Particulièrement élevée	Elevée	Modérée	Faible

Evaluation de l'extension des zones à considérer lorsque l'on prend en considération le paramètre "ruissellement" (valeurs indicatives)

a) Ruissellement diffuse le long des pentes

Pente	Extension à attribuer au bassin versant local
2-10%	10 mètres en amont ou autour de la surface vulnérable considérée
10-25%	20 mètres en amont de la surface vulnérable considérée
> 25%	30 mètres en amont de la surface vulnérable considérée

En présence de talwegs, chenaux, chemins ou drains collectant les eaux de ruissellement, l'extension du bassin versant local à considérer doit être étendue en conséquence.

L'extension des surfaces à considérer a été fixée sur la base d'observations réalisées essentiellement sur des secteurs de pâturage (zone montagneuse en Suisse). De manière générale, le ruissellement est souvent plus faible dans les secteurs de forêts, en raison de la présence d'un sol plus aéré d'épaisseur réduite. Dans ce cas, la prise en compte de bassins d'alimentation locaux d'extension plus petite (p.ex. 10 mètres même en cas de pentes supérieures à 25 % peut être admise.

b) cours d'eau permanents ou temporaires infiltrant

Extension à attribuer au bassin versant local	Lit et berges du cours d'eau, bassin versant local selon les critères de pente spécifiés ci-dessus pour le ruissellement.
---	---

Ces valeurs sont indicatives, du fait qu'elles ont été déterminées sur la base d'observation de terrain sur des aquifères fissurés et hétérogènes en Suisse. Le

principe de la méthode peut être transféré et adapté à d'autres contextes géologiques et climatiques.

Comme pour les autres méthodes de cartographie de la vulnérabilité, une bonne connaissance géologique ainsi que des caractéristiques hydrogéologiques d'un site ou d'un bassin d'alimentation sont nécessaires lorsqu'on veut appliquer de manière acceptable ce type de méthode.

Une relation d'équivalence entre le facteur de protection F et les périmètres de protection des eaux souterraines peut être proposée (Pochon & Zwahlen, 2003) :

Facteur de protection F	Vulnérabilité	Périmètre de protection
F très faible (0, 1)	Particulièrement forte	Immédiat
F faible (2, 3, 4)	Forte	Rapproché
F moyen (5, 6, 7)	Moyenne	Eloigné
F fort (8, 9, 10)	Faible	Le reste du bassin d'alimentation

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

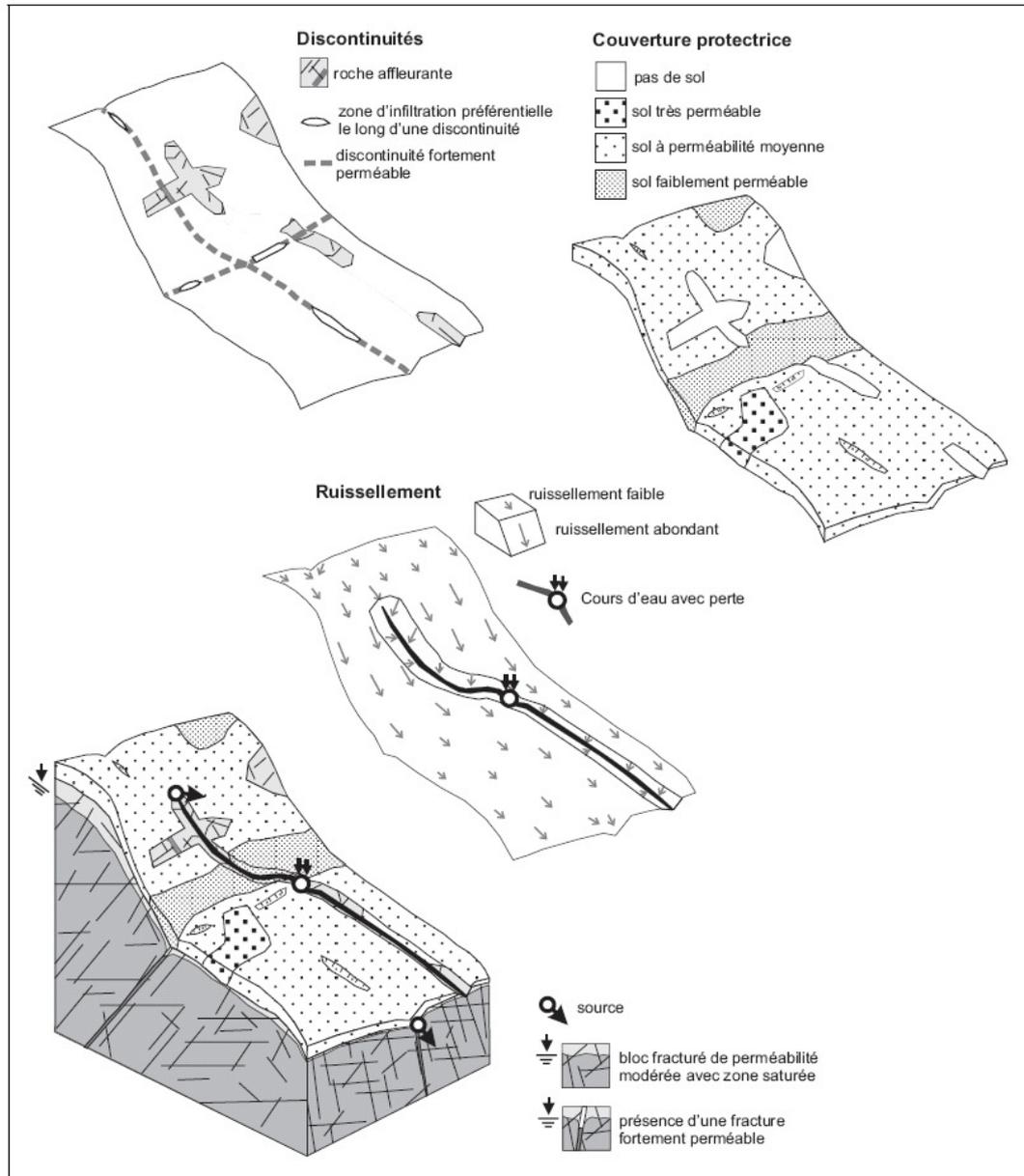


Illustration 114: Les trois paramètres utilisés dans la méthode DISCO pour les milieux fissurés hétérogènes (Pochon & Zwahlen, 2003)

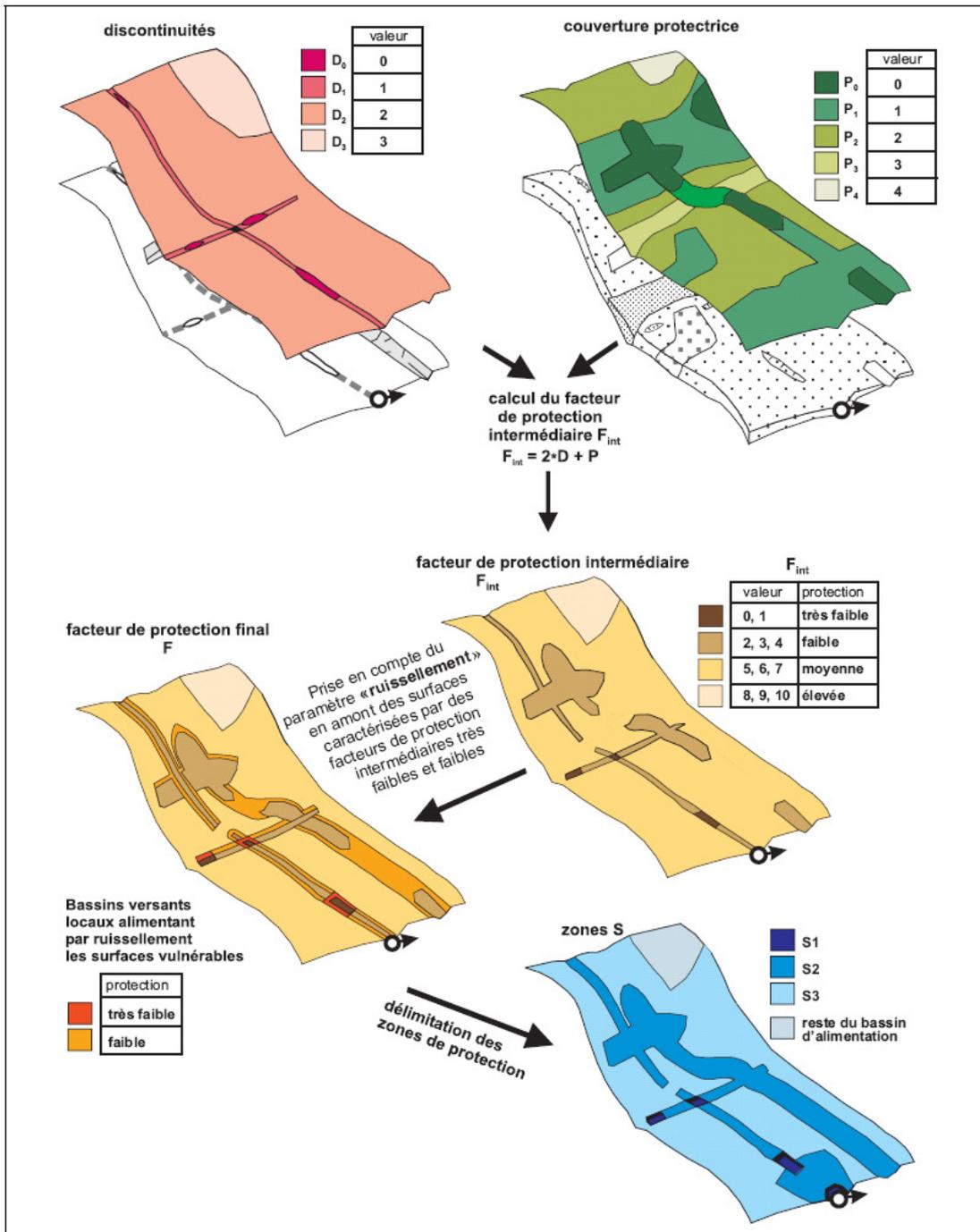


Illustration 115 – Délimitation des périmètres de protection (zones de protection en Suisse) selon la méthode de cartographie multicritère « DISCO » (Pochon&Zwahlen, 2003).

11. Méthode de cartographie de la vulnérabilité spécifique

La cartographie de l'aléa contamination des eaux par les phytosanitaires repose sur la cartographie de la vulnérabilité des eaux de surface et des eaux souterraines pour des unités de gestion définies au préalable à l'échelle régionale (pour plus de détail le lecteur se rapportera aux rapports du BRGM, notamment le rapport RP-51456-FR et RP-50569-FR pour la région Midi Pyrénées). A noter que cette méthode fait partie des méthodes de cartographie de la vulnérabilité d'un captage et non de la ressource, les écoulements préférentiels, la conductivité hydraulique ainsi que le volume d'eau de l'aquifère étant pris en considération. Ce dernier est pris en compte pour sa capacité de dilution ou d'atténuation du contaminant. Cette méthode est en grande partie basée sur des « dire d'expert » ; le résultat et son interprétation sont sujets à une grande subjectivité, fonction de l'expertise et de l'appréciation du manque de données disponibles pour attribuer une note.

Les facteurs et critères retenus ainsi que les pondérations utilisées à dire d'expert pour les eaux de surfaces (ESU) et les eaux souterraines (ESO) sont expliqués dans les tableaux ci-dessous :

Facteurs	Critères	Classe	Note	Coefficient du critère	Coefficient du facteur
Sol	Paramètres assemblés : perméabilité, battance, hydromorphie, épaisseur, .. *	Sensibilité faible	1	3	3
		Sensibilité moyenne	2		
		Sensibilité forte	3		
		Sensibilité très forte	4		
Réseau hydrographique	Densité hydrographique par unité de gestion	< 1.04km/km ²	1	2	2
		1.04 –	2		
		1.33km/km ²	3		
		> 1.33 km/km ²			
Topographie	Pente	<3%	1	3	7
		3-7%	2		
		> 7%	3		
	Végétaux filtres	0-10%	3	3	7
		10-23%	2		
		> 23%	1		
	Drainage	< 0.2%	1	1	7
		0.2 -4%	2		
		> 4%	3		
Climatologie	Pluies efficaces annuelles	<0	1	3	3
		0-150mm	2		
		> 150mm	3		

La note de vulnérabilité est obtenue selon la formule suivante, selon un principe de pondération (poids pour le critère):

$$\text{Vulnérabilité ESU} = (\text{note Sol} * 3) + (\text{note Densité} * 2) + (\text{note Pente} * 3) + (\text{Note Végétaux filtres} * 3) + (\text{Note drainage} * 1) + (\text{Note Pluies efficaces} * 3)$$

Les valeurs de vulnérabilité obtenues sont comprises entre 15 et 48 ; ces valeurs sont ramenées à une échelle de 0 à 100.

Le tableau ci-dessous présente un récapitulatif des notes et coefficients attribués à chaque critère des facteurs de la vulnérabilité des eaux souterraines ESO (RP-51456-FR)

Facteurs	Critères	Classe	Note	Coefficient du critère	Coefficient du facteur
Sol	Paramètres assemblés : perméabilité, battance, hydromorphie, épaisseur, .. *	Sensibilité faible	1	10	10
		Sensibilité moyenne	2		
		Sensibilité forte	3		
		Sensibilité très forte	4		
Zone non saturée	Épaisseur **	> 500m	1	4	10
		300-500	2		
		50-300	3		
		10-50			
		< 50m			
	Perméabilité (dire d'expert)	Négligeable	0	4	10
		Très faible	1		
		Faible	2		
		Forte	3		
Ecoulements préférentiels	Très limités	1	2	10	
	Peu importants	2			
	Importants	3			
Zone saturée	Épaisseur lame d'eau aquifère (épaisseur aquifère porosité efficace) *	>5	1	2	5
		2 à 5m	2		
		1 – 2m	3		
		< 1m	4		
	Perméabilité	Très faible	1	2	5
		Faible	2		
		Forte	3		
		Très forte	4		

	Écoulements préférentiels	Très limités Peu importants Importants	1 2 3	1	5
Climatologie	Pluies efficaces annuelles	<0 0-150mm > 150mm	1 2 3	?	?

La note de vulnérabilité est obtenue selon la formule suivante, selon un principe de pondération (poids pour le critère):

$$\text{Vulnérabilité ESO} = (\text{note Sol} * 10) + (\text{note Ep. ZNS} * 4) + (\text{note K ZNS} * 4) + (\text{Note Eclt Préf ZNS} * 2) + (\text{Note Lame d'eau ZS} * 2) + (\text{Note K ZS} * 2) + (\text{Note Eclts Préf. ZS} * 1)$$

Les valeurs de vulnérabilité obtenues sont comprises entre 17 et 97 ; ces valeurs sont ramenées à une échelle de 0 à 100.

Une deuxième méthode de caractérisation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates est présentée ci-après sur la base d'un article de Sigter et al. (2006). Il s'agit de l'utilisation de la méthode DRASTIC à laquelle la définition et le calcul d'un indice de susceptibilité spécifique « nitrates » ont été rajoutés. L'indice de susceptibilité (SI), une adaptation de la méthode DRASTIC, a été développée pour l'évaluation de la vulnérabilité d'aquifères (à une échelle entre 1 :50 000 au 1 :200 000) (Ribeiro 2000), vis-à-vis des pollutions diffuses d'origine agricole pour les contextes hydrogéologiques typiques du Portugal. L'adaptation réside dans le nombre de critères et dans la pondération utilisée : le critère sol n'est pas pris en compte, au vu des changements de propriétés des sols sous culture ; le type de sol est indirectement pris en compte par l'occupation du sol. L'occupation du sol est un nouveau critère prise en compte, avec une notification entre 0 et 100, distinguant les zones agricoles, les zones anthropiques et les zones naturelles.

Occupation du sol	Note
Zones agricoles	
- périmètres irrigués	90
- cultures permanentes	70
- zones agricole hétérogène	50
- zones de prairie, agro-forestières	50
Zones artificielles	
- décharges et dépôts industriels	100
- carrières, chantier naval, mines à ciel ouvert	80
- zones urbaines continues, aéroports, zones portuaires, routes, rails, zones industrielles et commerciales, espaces verts	75
- zones urbaines discontinues	70

Zones naturelles	
- environnements aquatiques (marais salants, lagunes, zones intertidales)	50
- Forêts et zones semi-naturelles	0
- Plans d'eau	0

Illustration 116 : Tableau du critères occupation du sol et note (Sigter et al., 2006).

Les deux autres critères non pris en compte dans cette adaptation de la méthode DRASTIC sont l'incidence de la zone non saturée (critère I). La zone non saturée peut avoir une capacité importante vis-à-vis de l'atténuation des nitrates ; cependant dans le cas de contaminants persistants et mobiles, la ZNS ne peut jouer qu'un rôle de retard, avec une atténuation insignifiante. Dans les cas des aquifères étudiés, les conditions relatives à l'anaérobiose du milieu et de la présence de matière organique pouvant favoriser la dénitrification, ne sont pas remplies. Le dernier paramètre de DRASTIC non pris en compte est la conductivité hydraulique (C°) de l'aquifère. Ce paramètre ainsi que sa distribution spatiale sont extrêmement difficile à déterminer. De plus ce critère est déjà pris en compte dans le type d'aquifère (A) de manière qualitative.

La cartographie des paramètres des deux approches DRASTIC et adaptation de DRASTIC (SI) est obtenue à partir des cartes individuelles sous système d'information géographique (SIG). Pour chaque cellule de la grille (25m d'espacement dans le cas présent), les deux indices sont calculés de la manière suivante :

- (i) $DRASTIC = 5 * D + 4 * R + 3 * A + 2 * S + T + 5 * I + 3 * C$
- (ii) $SI = 0.186 * D + 0.212 * R + 0.259 * A + T + 0.222 * LU$

Une carte de concentrations des nitrates de la zone d'étude a été établie afin d'évaluer les résultats obtenus par les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates. La confrontation des deux cartes n'est pas triviale ; il y a un certain nombre de divergence. Une étude de corrélation entre les classes de vulnérabilité et les classes de concentration en nitrate a été effectuée, et a permis de proposer une amélioration dans la démarche de cartographie de la vulnérabilité spécifique.

12. Méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers

Une cartographie spécifique de la vulnérabilité pour les aquifères karstiques côtiers a été développée (méthode GALDIT) dans le cadre du projet européen COASTIN (4^{ème} PCRD, programme INCO DEV) (Chachadi & Lobo Ferreira, 2001).

Le risque de pollution liée à l'intrusion saline dépend (i) de la vulnérabilité de l'aquifère et (ii) de l'existence de points d'exploitation de la ressource à proximité de la côte. C'est ainsi possible d'avoir un aquifère à haute vulnérabilité sans risque d'intrusion saline s'il n'y a pas d'exploitation importante de la ressource à proximité de la côte et d'avoir un risque de pollution importante par intrusion malgré une faible vulnérabilité de l'aquifère, si les volumes pompés sont particulièrement importants.

De plus, dans le cas d'environnement karstique côtier, l'existence de sources sous marines et côtières doivent être prise en considération. Les pompages le long de la côte peuvent également influencer les intrusions salines, mais il est essentiel de localiser le réseau karstique au sein d'une matrice fissurée de faible perméabilité. Le développement d'un réseau karstique de drainage dont l'exutoire est une ou plusieurs sources sous marines doit être pris en considération dans le cadre d'une cartographie de la vulnérabilité, avec par exemple le critère spécifique « K » de la méthode RISK, ainsi que la direction préférentielle de drainage souterrain, les discontinuités telles que les fractures ou les alignements de dolines.

La méthode GALDIT a été développée selon une **approche de cartographie facile à appliquer à l'aide de données facilement disponibles**. La méthode repose sur le principe de détermination d'indice de vulnérabilité et d'attribution de classes de vulnérabilité. Les facteurs les plus importants à cartographier qui contrôlent notamment l'intrusion saline, sont les suivants :

- *Groundwater occurrence* (type d'aquifère, libre, captive et semi-captif)
- *Aquifer hydraulic conductivity* (conductivité hydraulique de l'aquifère)
- *Depth to groundwater level above sea* (profondeur à la nappe au dessus du niveau de la mer)
- *Distance from the shore* (distance perpendiculaire à la côte)
- *Impact of existing status of seawater intrusion in the area* (impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la région concernée)
- *Thickness of the aquifer* (épaisseur de l'aquifère)

La combinaison de ces facteurs constitue les fondements de base nécessaires à l'évaluation d'une intrusion saline potentielle pour chaque contexte hydrogéologique; la méthode GALDIT n'a pas été développée spécifiquement pour des aquifères côtiers hétérogènes tels que sont les aquifères fissurés et les aquifères karstiques côtiers. Un système de classification et de pondération pour évaluer les potentialités d'une intrusion saline dans un contexte géologique données a été établi à partir de l'utilisation des facteurs de la méthode GALDIT. Le système comprend trois parties essentielles : la **pondération**, le **rang** et la **classification**. Chaque poids des facteurs est déterminé en considération l'importance relative de chaque facteur. Un poids de 1 à 4 est attribué (1 : influence moindre et 4 : grande influence). Une valeur de 1 à 10 est donnée à chaque facteur en fonction des conditions locales (plus la valeur est importante plus la vulnérabilité est grande). Les valeurs attribuées sont obtenues à

partir de tables de correspondance entre les caractéristiques hydrogéologiques locales et la valeur du paramètre. L'indice de vulnérabilité résulte de la multiplication des valeurs des facteurs par le poids de pondération associé (Chachadi & Lobo Ferreira, 2001) (cf. annexe 4).

Paramètres de GALDIT	Poids
Groundwater occurrence (aquifer type)	1
Aquifer hydraulic conductivity	3
Depth to groundwater level above sea	4
Distance from the shore	2
Impact of existing status of seawater intrusion	1
Thickness of aquifer being mapped	2

Ainsi, la valeur minimale de l'indice de la méthode GALDIT est 13 et la valeur maximale de 130. L'impact des six paramètres de la méthode GALDIT sur l'intrusion saline est décrit ci-dessous:

- i. Groundwater occurrence (type d'aquifère) (G): Dans le contexte naturel, les eaux souterraines prennent place généralement au sein de formations géologiques qui donnent naissance à des aquifères libres, captifs ou semi-captifs. Le contexte géologique des aquifères côtiers (géométrie, organisation des formations perméables et imperméables) a une influence indéniable sur la présence et sur l'extension d'une intrusion saline. Ainsi, lorsque le poids du paramètre G est attribué, il est nécessaire d'étudier de manière détaillée la disposition et la nature ou le type d'aquifères présents dans la zone d'étude. La valeur du paramètre G est de manière générale attribuée de la manière suivante: libre (9), captif (10) et semi-captif (8). Un aquifère captif est plus vulnérable du fait de l'existence d'un cône de dépression plus important lors de pompage. Dans le cas d'un aquifère multicouche, la valeur la plus importante devrait être adoptée (Chachadi & Lobo Ferreira, 2001). Le type d'aquifère, concernant la nature des écoulements en aquifère libre ou captif doit être prise en considération pour les aquifères karstiques côtiers.
- ii. Aquifer hydraulic conductivity (A): Ce paramètre est utilisé pour déterminer la vitesse d'écoulement de l'eau au sein de l'aquifère. Par définition, la conductivité hydraulique traduit l'aptitude du milieu à transmettre l'eau au sein de l'aquifère. La conductivité hydraulique résulte de l'interconnectivité des pores (porosité efficace) dans les sédiments non consolidés et des fractures pour les milieux consolidés. L'importance du front d'intrusion saline est influencée par la conductivité hydraulique – plus la conductivité est grande, plus le front de pénétration de l'intrusion saline est important. Une conductivité hydraulique grande a pour conséquence également un grand cône de dépression lors d'un pompage. Dans ce cas, l'utilisateur doit prendre en considération la présence de barrières hydrauliques tels que des niveaux argileux et des dykes imperméables parallèles à la côte, qui peuvent constituer des murs vis-à-vis de l'intrusion saline. Des valeurs caractéristiques pour ce facteur se trouvent dans les publications de Aller, Bennett, Lehr et al. (1987 in

Chachadi & Lobo Ferreira, 2001). Pour les aquifères karstiques côtiers, une description spéciale de la valeur de l'indice pour ce facteur devrait être développée, prenant en considération les discontinuités, la présence de phénomènes morphologiques de l'endo et l'exokarst.

- iii. Depth to groundwater level above sea (L): le niveau piézométrique par rapport au niveau moyen de la mer est un facteur important pour évaluer l'intrusion saline dans la zone d'étude, car il détermine le potentiel hydraulique capable de repousser le front d'intrusion saline. Tel que défini par l'équation de Ghyben-Herzberg, pour chaque mètre d'eau douce stocké au dessus du niveau de la mer, ce sont 40 mètres d'eau douce qui sont présents sous l'interface eau douce eau salée ainsi définie. L'attribution de la valeur de l'indice du facteur L doit prendre en considération les variations du niveau piézométrique sur le long terme. De manière générale, il est important de ne pas considérer uniquement une valeur piézométrique moyenne, mais d'examiner avec attention les périodes pour lesquelles le niveau piézométrique est le plus bas, au dessus du niveau de la mer ; ce type de situation correspond à la plus grande vulnérabilité possible. Pour l'attribution des valeurs, on peut se rapporter aux valeurs proposées par Aller, Bennett, Lehr et al. (1987, in Chachadi & Lobo Ferreira, 2001).
- iv. Distance from the shore (D): L'impact de l'intrusion saline généralement décroît plus on s'éloigne de la côte. La valeur maximale de l'indice peut être de 10 pour des distances à la côte inférieures à 100m. La valeur peut être diminuée de 1 par 100m, de la côte jusqu'à quelques 800m. Une valeur de 2 est acceptable pour des distances comprises entre 801 et 1000m ; une valeur de 1 est adoptée pour des distances supérieures à 1001m (Chachadi & Lobo Ferreira, 2001). La notion de distance doit être prise en considération avec prudence dans le cas d'aquifères karstiques côtiers; l'intrusion saline dépend de la présence de conduits karstiques. Ce paramètre n'est peut être pas directement transposable pour ce type d'aquifère.
- v. Impact of existing status of seawater intrusion (I): La zone considérée peut être de manière variable d'ores et déjà affectée par une intrusion saline; l'équilibre hydraulique naturelle entre l'eau douce et l'eau salée est ainsi déjà modifié. Cet état doit ainsi être considéré lors de la cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion saline. Trois cas de valeurs d'indices pour ce facteur peuvent être considérés: (a) zones déjà contaminées par une intrusion saline en toutes saisons ou les échantillons d'eau souterraine montrent des rapports de $Cl / (HCO_3 + CO_3)$ plus grand que 2 epm, (b) zones avec des intrusions salines saisonnières ou les échantillons d'eau souterraine montrent des rapports de $Cl / (HCO_3 + CO_3)$ compris entre 1.5 et 2 epm, et (iii) zones où des intrusions salines ont existées dans le passé ou les échantillons d'eau souterraine montrent des rapport de $Cl / (HCO_3 + CO_3)$ inférieur à 1.5 epm. Ce type d'information nécessaire à l'attribution de la valeur de l'indice, peut être collecté dans des rapports précédents et à partir d'analyses chimiques (Chachadi & Lobo Ferreira, 2001). Des logs de température et de conductivité électrique au niveau de forages situés dans la zone côtière de l'aquifère permettent

également de déterminer la variabilité spatiale de l'intrusion saline, les variations saisonnières ainsi que la distribution verticale. Ce type de mesures avec une représentation cartographique peut permettre également de distinguer des classes d'indice en fonction des ordres de grandeurs de la conductivité électrique.

- vi. Thickness of the aquifer being mapped (T): L'épaisseur de l'aquifère ou de la zone saturée d'un aquifère libre joue un rôle important dans la définition de l'extension et de l'importance de l'intrusion saline dans les zones côtières. Il est clairement établi que plus l'épaisseur de l'aquifère est importante, plus l'extension de l'intrusion saline est petite, et vice versa. Ainsi, selon ce principe, la valeur d'indice de 10 est donnée pour les aquifères dont l'épaisseur est moins d'1 mètre; cette valeur est réduite d'une valeur unitaire par un mètre d'augmentation de l'épaisseur de l'aquifère, jusqu'à 8 m. Pour les aquifères d'une épaisseur comprise entre 8,1 et 10m, la valeur de l'indice proposée est de 2 ; au-delà de 10.1m la valeur constante de l'indice est de 1. (Chachadi & Lobo Ferreira, 2001). Ce paramètre peut être utilisé pour les aquifères karstiques côtiers, pour autant que l'information géologique relative à la géométrie de l'aquifère est disponible. La variation de l'épaisseur de l'aquifère peut être directement lié au gradient hydraulique; celui ci peut être variable au sein d'un aquifère karstique en fonction de la présence d'hétérogénéités (cavités, conduits dans la zone saturée) plus importantes à proximité de la côte (Bekesi, G. and McConchie, J., 2000).

13. Exemple d'application de la méthode RISK en Franche-Comté

Un certain nombre d'exemples de caractérisation de la vulnérabilité à l'aide d'approche multicritère, dérivée de la méthode DRASTIC, existe parmi les études de service public du BRGM. On peut citer la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la région Bourgogne (Jauffret et al., 2001), ou encore la vulnérabilité des eaux souterraines de la région Languedoc-Roussillon (Blaise et al., 2004)

Un exemple d'application de la méthode RISK en Franche Comté est donné ci-après, afin d'illustrer l'application de cette méthode.

La méthode RISK a été développée dans le cadre d'une étude cofinancée par la DIREN de Franche-Comté et par le BRGM. Elle a été appliquée sur deux bassins d'alimentation, de taille différente. Elle a fait l'objet d'un rapport (Dörfliger et al., 2004) ainsi que de l'élaboration d'un guide méthodologique d'application. Un exemple d'application sur le système karstique de la source d'Arcier est résumé ci-dessous.

Contexte géologique et hydrogéologique du bassin d'Arcier

Le bassin d'alimentation de la source d'Arcier s'étend, immédiatement à l'est de la ville de Besançon, sur environ 110 km². Il est constitué d'une vaste plaine qui se tient à environ 400 à 450 m d'altitude. Cette plaine est bordée au SE par un relief orienté SW/NE qui culmine à 700 m d'altitude. Au NW, elle est bordée par un autre relief qui

culmine à 600 m d'altitude et qui domine directement la vallée du Doubs et la ville de Besançon. Ce relief rend compte assez exactement de la structure géologique.

Les formations constitutives du bassin de la source d'Arcier, comme celles de tout le massif jurassien, sont de nature calcaire et karstifiée avec seulement quelques niveaux marneux. L'exutoire du bassin, la source d'Arcier, est situé au niveau de la vallée du Doubs, à l'extrémité NW du bassin d'alimentation à une altitude de 300 m.

Structure géologique du bassin d'alimentation de la source d'Arcier

Le système géologique de la source karstique d'Arcier résulte d'une structure géologique assez particulière.

La succession des formations géologiques des environs de Besançon sont les suivantes, des formations les plus anciennes aux plus récentes :

- Le **Lias** constitué de marnes et d'argiles ; ce sont les formations les plus anciennes que l'on rencontre à l'affleurement dans le Jura bisontin (leur substratum, les formations du Trias, n'affleure jamais dans la zone considérée ici) ;
- Le **Jurassique moyen** (Bajocien et Bathonien) constitué de calcaires le plus souvent massifs ; leur puissance totale atteint 150 à 200 m ;
- Le **Jurassique supérieur marneux** (Callovien et Oxfordien inférieur) ; on y rencontre des niveaux de marnes et des niveaux de calcaires marneux ; la puissance totale de cet ensemble atteint environ 100 m ;
- Le **Jurassique supérieur calcaire** (Oxfordien supérieur) ; il est constitué de calcaires massifs mais avec un petit niveau marneux dans sa partie moyenne ; sa puissance totale atteint environ 150 m ;
- Le **Kimméridgien** constitué de calcaires compacts associés à des calcaires marneux ; c'est la formation la plus récente qui affleure dans le Jura bisontin en dehors des formations superficielles (alluvions et Plioquaternaire). Ces formations sont disposées, dans le bassin de la source d'Arcier, globalement en une cuvette synclinale (Illustration 117). Le fond de la cuvette est occupé par le Jurassique supérieur calcaire affleurant qui repose, en succession normale et à peu près horizontale, d'abord sur le Jurassique supérieur marneux puis sur le Jurassique moyen calcaire puis sur le Lias.

La cuvette synclinale est bordée au NW et au SE par des anticlinaux faillés et chevauchant constitués de Jurassique moyen calcaire à cœur de Lias et dénommés faisceaux : - sur la bordure SE du bassin, le faisceau de Mamirolle qui chevauche la cuvette vers le NW par une bande tectonisée, - sur la bordure NW, le faisceau bisontin qui chevauche des formations du Kimméridgien vers le NW c'est à dire à l'extérieur de la cuvette.

Par rapport à la disposition du relief évoquée ci-dessus, la cuvette synclinale est occupée par la plaine dénommée cuvette de Saône-Nancray et les deux faisceaux par

les deux bandes de relief bordiers, le relief du SE par le faisceau de Mamirolle et le relief du NW par le faisceau bisontin.

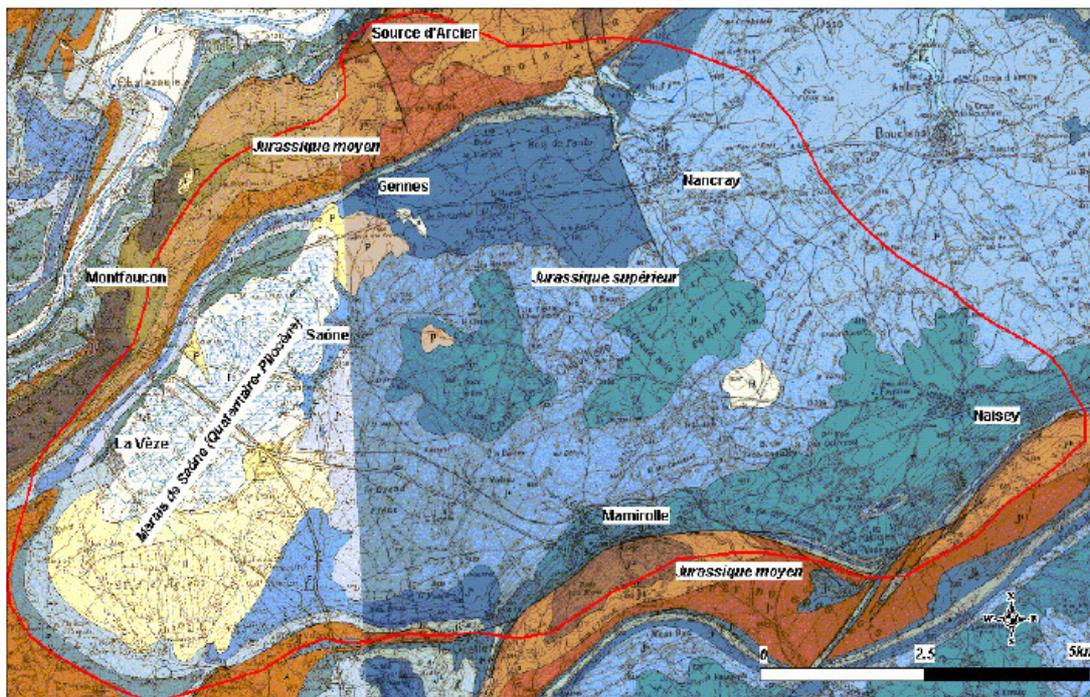


Illustration 117 - extrait de la carte géologique au 1/50 000 (édition brgm) au niveau du bassin d'alimentation de la source d'Arcier

Hydrogéologie

L'hydrogéologie du bassin d'alimentation de la source d'Arcier dépend directement de la succession des couches géologiques et de leur structure. Par ailleurs, les nombreuses expériences de traçage réalisées ont permis de mieux connaître l'hydrogéologie et le cheminement des eaux de ce bassin (« Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche Comté », Annales scientifiques de l'Université de Besançon, géologie, mémoire n°2, 1987 et « Circulations souterraines reconnues par traçage, inventaire DIREN Franche Comté », 2003, CDROM sous ACCESS).

Les traçages ont permis de déterminer le bassin d'alimentation de la source d'Arcier. Après des essais de coloration ayant donné naissance à diverses hypothèses sur les écoulements souterrains, deux traçages réalisés en 1985 ont montré que la résurgence unique de l'une des pertes est la source d'Arcier. D'autres colorations et l'analyse de la structure géologique ont permis de définir les limites du bassin d'alimentation de la source. Son étendue est de l'ordre de 100 km². (Dorfliger et al., 2004)

Globalement, il y a deux aquifères karstiques superposés, - l'aquifère supérieur dans le Jurassique supérieur calcaire (Oxfordien supérieur),- l'aquifère inférieur dans les calcaires du Jurassique moyen (Callovien, Bathonien et Bajocien). Ces deux aquifères sont séparés par le niveau peu perméable du Jurassique supérieur marneux (Oxfordien inférieur). Du fait de la tectonique, de nombreuses communications existent entre ces deux aquifères malgré les formations marneuses intermédiaires. Enfin les argiles du Lias constituent le substratum imperméable de ces ensembles.

Les précipitations sur la cuvette de Saône-Nancray ruissellent ou s'infiltrent dans le Jurassique supérieur calcaire affleurant. Plus précisément, les précipitations s'infiltrent essentiellement dans les zones de dolines qui couvrent des surfaces importantes (Illustration 118) et rejoignent alors l'aquifère karstique du Jurassique supérieur calcaire dont la profondeur de la surface piézométrique en basses ou moyennes eaux n'est pas précisément connue.

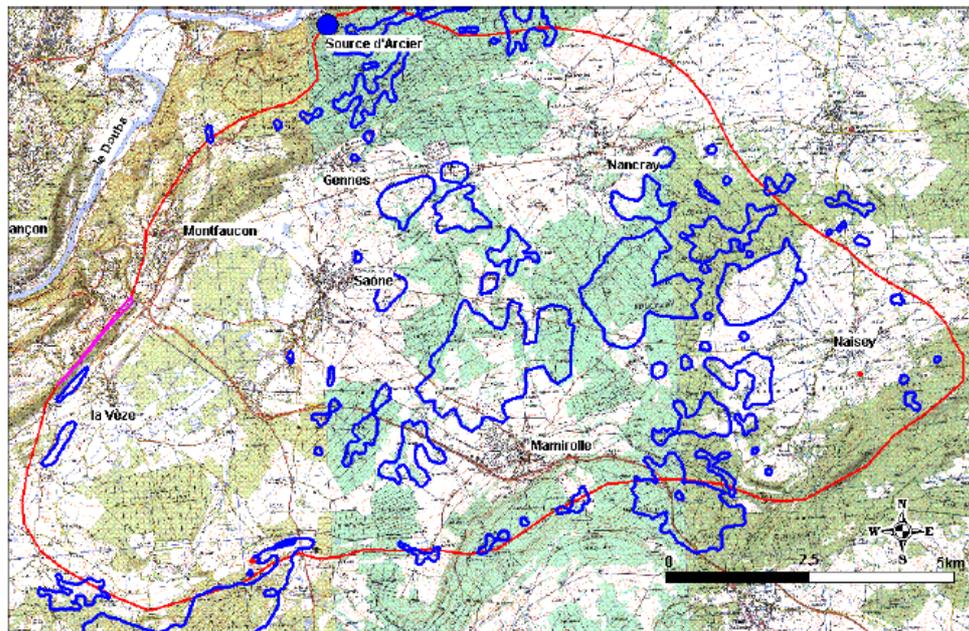


Illustration 118 - Répartition des dolines et zones de dolines à l'échelle du bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

Trois zones se distinguent cependant - Nancray et ses environs où les précipitations qui s'infiltrent sont arrêtées à faible profondeur par quelques niveaux marneux (base de l'aquifère supérieur) ; il se forme alors des nappes locales peu profondes (présence de puits avec pompes à roues dans le bourg de Nancray) qui donnent naissance à de petites sources (anciens captages dans le bourg de Nancray, abreuvoir sur source au Sud du bourg) dont le regroupement donne naissance au ruisseau de Nancray et au ruisseau du Moulin ; ces deux ruisseaux présentent un écoulement qui semble à peu près permanent sur le Jurassique supérieur marneux qui affleure au Nord de Nancray (bordure N de la structure synclinale) et finissent par se perdre dans des gouffres dès leur arrivée sur les affleurement de Jurassique moyen (ils rejoignent ainsi directement

l'aquifère du Jurassique moyen); - La zone de la Baraque des violons et de la Vèze où, du fait du relèvement des couches (bordure SW de la cuvette synclinale), le Jurassique supérieur marneux affleure et apparaissent alors de très petites sources et des écoulements qui semblent permanents ; dès qu'ils arrivent sur les affleurements de Jurassique moyen, ces écoulements se perdent dans de grosses dolines d'où ils atteignent directement l'aquifère du Jurassique (moyen); - La zone du marais de Saône qui est située dans la partie la plus basse de la cuvette synclinale et qui est occupée par des formations sablo-argileuses plio-quadernaires, d'où la présence du marais ; les eaux du marais se perdent dans des gouffres dès qu'elles quittent les formations plio-quadernaires et arrivent sur les formations du Jurassique supérieur calcaire (gouffres du Creux sous Roche et quelques autres).

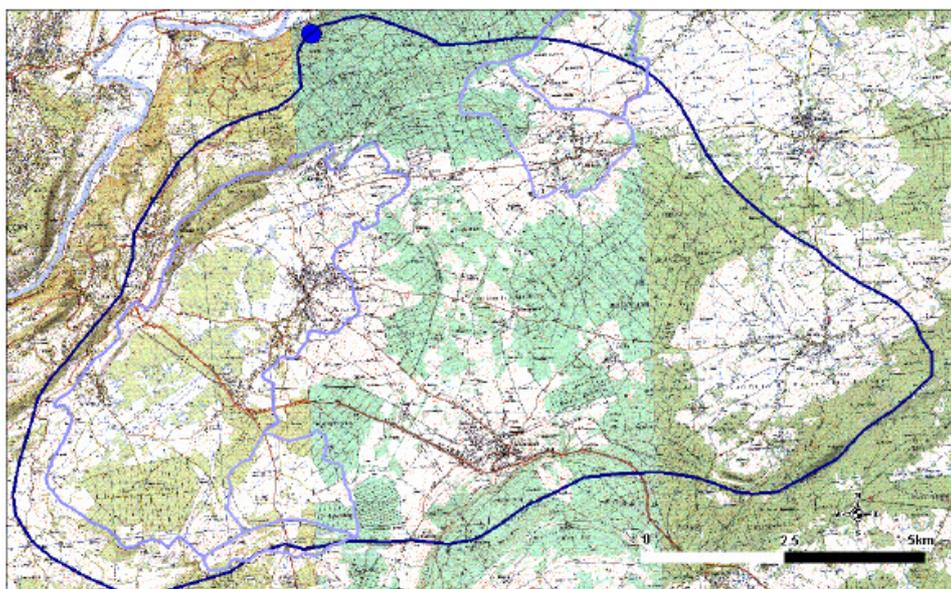


Illustration 119 - Bassins versants de surface sur le bassin d'alimentation de la source d'Arcier

Caractérisation des critères

Les zones de forêt n'ont pas fait l'objet de la cartographie ; ces zones dans le cadre de la procédure des périmètres de protection peuvent faire l'objet de recommandations concernant l'usage de produits phytosanitaires et du traitement du bois stocké.

a. Nature de la roche aquifère

A partir de la carte géologique et de la nature lithologique des formations aquifères, deux classes ont été distinguées à l'échelle du bassin d'alimentation de la source d'Arcier, à savoir :

(i) la classe 2 (vulnérabilité moyenne) pour les formations du Jurassique supérieur

(ii) la classe 3 (vulnérabilité forte) pour les formations du Jurassique moyen. Le Jurassique moyen est constitué de calcaires massifs, karstifiés ; cette définition s'apparente à la définition de la classe 2.

Le Jurassique supérieur est constitué d'une part de formations marneuses avec des niveaux calcaires intercalés et d'autre part de calcaires massifs avec de petits niveaux marneux dans sa partie moyenne.

Ces caractéristiques correspondent à la classe 3 de la méthode RISK.

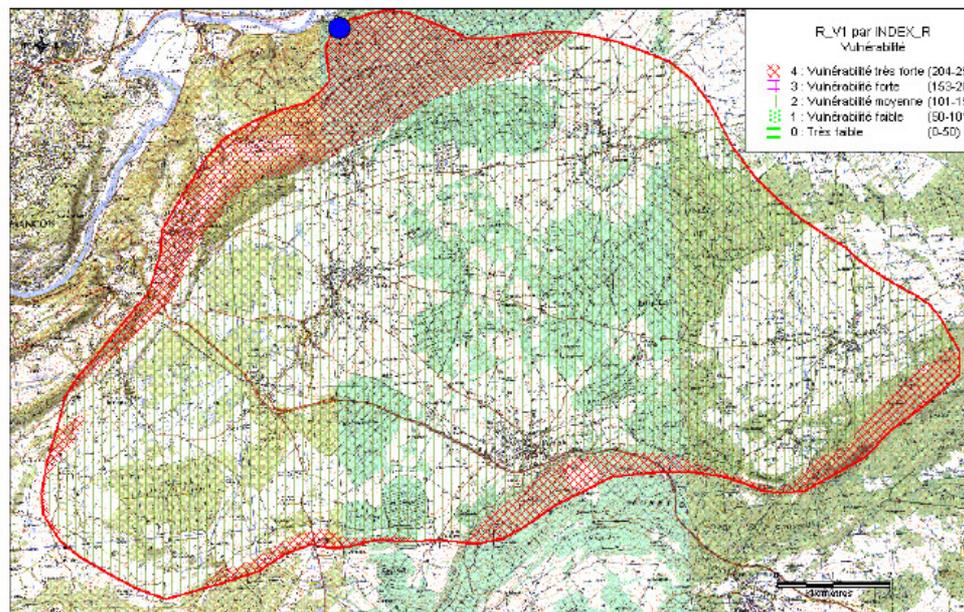


Illustration 120 - carte du critère R pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier

b. Conditions d'infiltration

La carte du critère I « conditions d'infiltration » a été établie d'une part à l'aide du modèle numérique de terrain de la zone d'étude et d'autre part en intégrant les objets de type pertes, dolines et vallées sèches selon la définition du critère. Les classes de pente selon la définition des classes de ce critère ont été effectuées à l'aide du logiciel IDRISI.

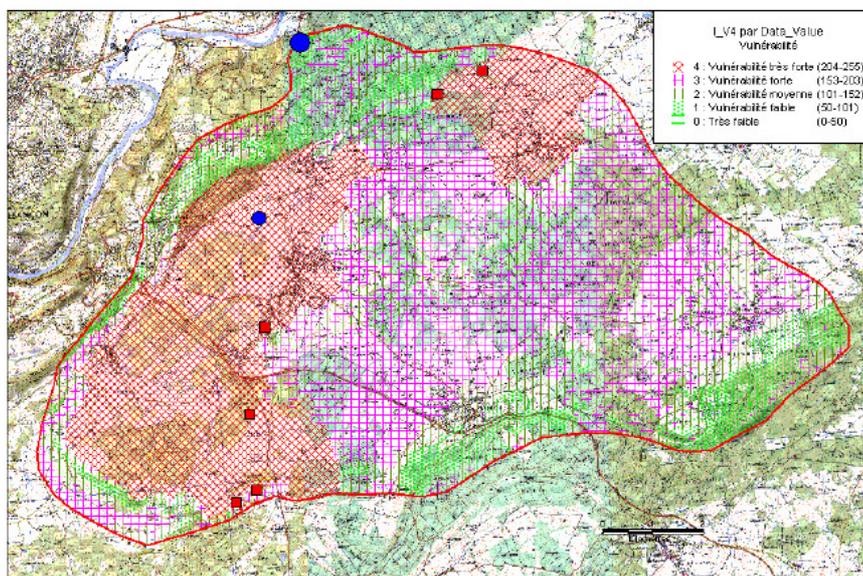


Illustration 121 – Carte du critère I du bassin d'alimentation de la source d'Arcier

Quatre classes de 1 à 4 sont présentes sur la carte du critère I (Illustration 121). Les zones de vulnérabilité les plus fortes vis à vis de l'infiltration sont notamment les bassins versants des principales pertes, comprenant particulièrement le marais de Saône. Les vulnérabilités les plus faibles avec la classe 1 et 2 se trouvent sur les bords du bassin d'alimentation là où les pentes sont les plus fortes (reliefs marqués du Jurassique moyen). Les pertes, correspondant à vulnérabilité très forte sont localisées avec des carrés rouges. Les zones de dolines sont en classe 3 et constituent l'essentiel de la partie centrale du bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

c. Sol – couverture protectrice

La carte du sol – couverture protectrice a été établie en considérant d'une part l'étude menée par le GRAP sur le bassin d'alimentation de la source d'Arcier et d'autre part par des vérifications et des mesures ponctuelles sur le terrain (3 jours de terrain, quelques 50 points visités et 50 mesures d'épaisseur à la tarière manuelle).

A partir de la typologie des sols de l'étude du GRAP (2003), en considérant la texture, la pierrosité et l'ordre de grandeur des épaisseurs de sol, une traduction dans les classes de la méthode RISK a été effectuée. Cette traduction tient compte des observations de terrain (Illustration 122).

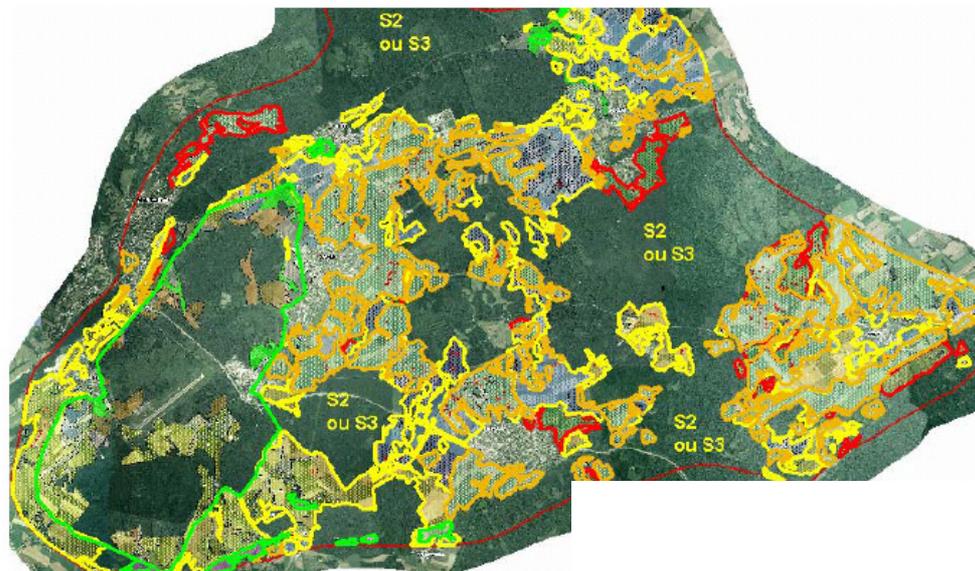


Illustration 122 – Carte de répartition des sols à partir de l'étude du GRAP (2003) pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier.

Quatre classes de sol, S1 à S4 sont présentes à l'échelle du bassin d'alimentation de la source d'Arcier, en dehors des zones de forêt. La vulnérabilité faible (S1) correspond aux zones où les sols ou la couverture protectrice sont les plus puissants et protecteurs ; ce sont notamment les zones du marais de Saône et les zones bordières du ruisseau de Nancray. La vulnérabilité moyenne du point de vue de la couverture protectrice des zones en limites du marais de Saône, mais également dans la partie environnante de Nancray, dans la zone périphérique et centrale de la partie SE du bassin (Naisey) ainsi qu'aux environs de Mamirolle (N et SW). La classe S3 est présente au niveau des sols sur les formations du Jurassique moyen (N et S du bassin), ainsi que dans la partie centrale du bassin et l'essentiel des terrains autour de Naisey. Finalement, la classe S4 de vulnérabilité très forte vis-à-vis des sols et de la couverture protectrice est présente en 4 secteurs du bassin d'alimentation : au niveau du plateau de Montfauconn (lieu-dit La Combe aux Bâtards), de la zone SE de Nancray (lieux dits la Combe de Roche et Le Peu, Derrière le Peu), de la zone centrale de Mamirolle et au niveau de quelques zones dans le secteur de Naisey (lieux dits Cratot Blanc, La Croix de l'Euserole, l'amont de la Combe aux Serpents, au Sud du Pré Chennoz) (Illustration 123).

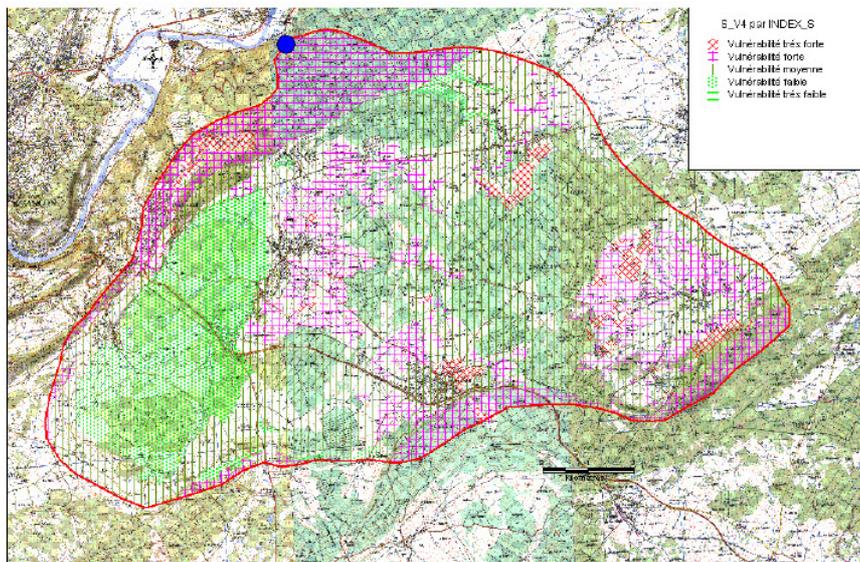


Illustration 123 – Carte du critère S pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier

d. Développement de la karstification – critère K

Le système karstique de la source d'Arcier au vu du comportement de vidange du marais de Saône au Creux sur Roche, (vidange en quelques heures), des variations de débit la source d'Arcier lors des crues, et des vitesses de traçage importantes (« Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche Comté », Annales scientifiques de l'Université de Besançon, géologie, mémoire n°2, 1987) atteignant plus de 300m/h en période de hautes eaux, peut être considéré comme étant caractérisé par un degré de karstification important (K3).

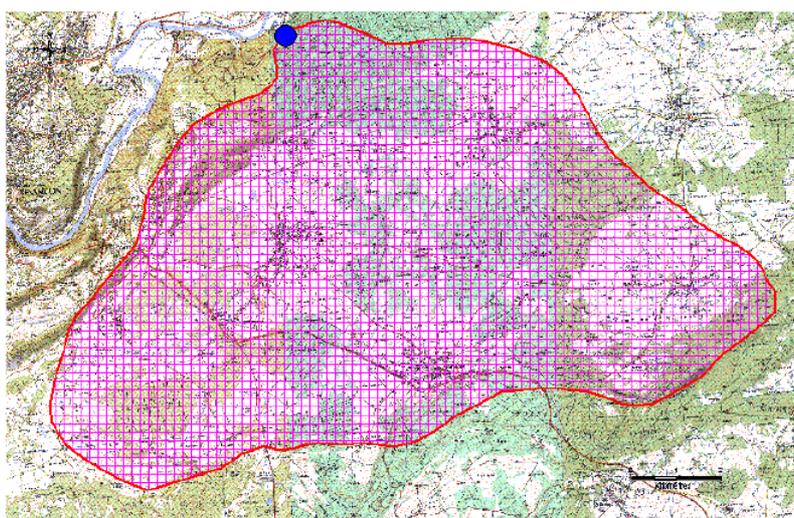


Illustration 124 – Carte du critère K pour le bassin d'alimentation de la source d'Arcier

Carte de vulnérabilité

Les caractéristiques de la carte de vulnérabilité globale du bassin de la source d'Arcier pour le système de pondération suivant : $0,1 R + 0,5 I + 0,1 S + 0,3 K$ sont les suivantes (Illustration 125): 4 classes de vulnérabilité sont présentes, avec une dominante des classes 3 et 4, vulnérabilité forte à très forte. Deux grandes zones de vulnérabilité très forte concernent le secteur du marais de Saône ainsi que le bassin versant du ruisseau de Nancray.

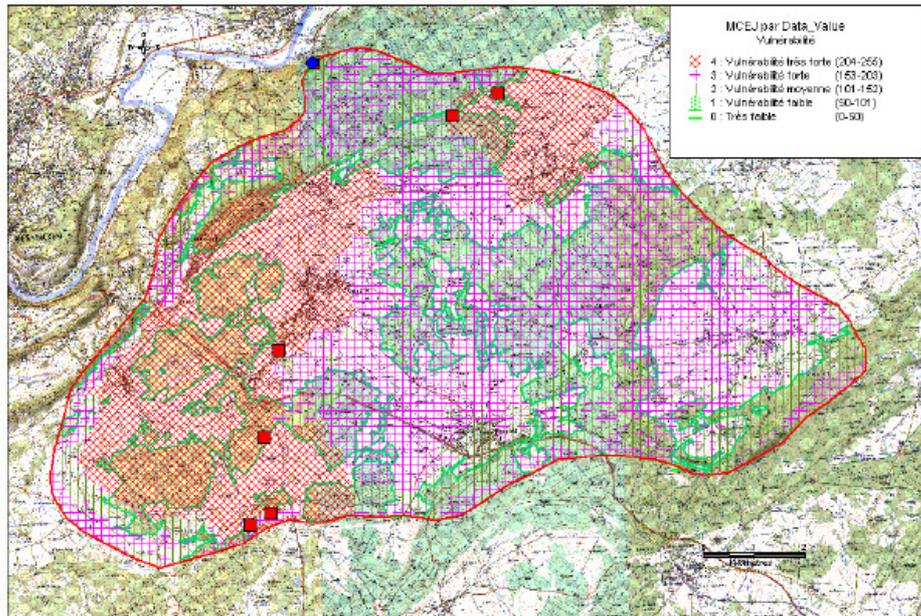


Illustration 125 – Carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation de la source d'Arcier pour le système de pondération suivant : $0.1 R + 0.5 I + 0.1 S + 0.3 K$

Les secteurs de vulnérabilité forte correspondent notamment aux zones bordières du bassin ainsi qu'aux zones avec une densité de dolines importantes.

Les classes de vulnérabilité moyenne et faible sont situées dans le Sud du bassin au Sud de Mamirolle et la partie SW du bassin en bordure du marais de Saône.

La carte de vulnérabilité globale de la méthode RISK semble être cohérente, distinguant plusieurs zones de vulnérabilité marquées soit par le critère infiltration, soit par la combinaison infiltration, roche et sol. Le marais de Saône ainsi que le bassin versant du ruisseau de Nancray ressortent comme zones les plus vulnérables. Au vu du rôle hydrogéologique du marais de Nancray, qui en périodes de hautes eaux est inondé et se vidangent en quelques heures, la vulnérabilité de cette zone est importante.

Annexe 5

Liste des documents transmis par l'Agence de l'Eau

Annexe 6

Fiches synthétiques des rapports transmis par l'Agence de l'Eau

Identifiant de l'étude 1		Département 89	Commune(s) Saints	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude Etude du bassin d'alimentation du captage AEP de la source des Gondards à SAINTS (89)				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/12/2005	Chambre d'Agriculture de l'Yonne	Chambre d'Agriculture de l'Yonne?		
Objectif(s) de l'étude Identification du BAC et proposition d'un plan d'actions				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
12-18 mois	35876 euros	AESN		
Type d'aquifère Sédimentaire karstique (Calcaires du Jurassique)				
Caractéristiques du ou des captage(s) source des Gondards - 90 m3/h en moyenne				
Méthode de délimitation du BAC deux limites : aquifère de Forterre / nappe de Forterre (variations saisonnières et spatiales). Détermination des limites du bassin d'alimentation hydrogéologique sur la base de la géologie, des failles et des crêtes piézométriques Hautes Eaux et Basses Eaux				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique délimitation de l'aquifère - coupes hydrogéologiques				
Carte piézométrique Pas de carte dans le rapport mais les crêtes piézométriques sont connues(?). Des mesures piézométriques ont été faites				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages oui (ponctuel)				
Carte de vulnérabilité oui (utilisation au départ de la carte de vulnérabilité du BRGM au 1/50.000). Méthode INDIGO pour les sols				
Etude des sols bibliographie et campagne de sondages pédologiques				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles Enquête auprès de 51 agriculteurs				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire cartes assolement - pression d'azote - risque de lessivage (méthode indigo)				
Plan d'actions modification des pratiques agricoles avec carte de priorités et aménagements				
Indicateurs suivi analytique mensuel (nitrates, turbidité, phytos) / suivi évolution occupation des sols / suivi évolution des pratiques agricoles				

Identifiant de l'étude 2		Département 78	Commune(s) 8 communes concernées	Direction de secteur DRIF
Intitulé de l'étude CCTP Protection des captages d'eau potable dans le département des YVELINES (78) - 8 lots (1 par captage)				
Année 28/06/1905	Réalisation CG des YVELINES	Maîtrise d'ouvrage CG des YVELINES		
Objectif(s) de l'étude établissement des PP de 8 AEP				
Temps passé pas de délais	Coûts	Partenaires AESN?		
Type d'aquifère non précisé				
Caractéristiques du ou des captage(s) non précisé				
Méthode de délimitation du BAC "à partir de données piézométriques et hydrogéologiques". "Le type de nappe, le type d'alimentation, le mode d'écoulement (...) seront les éléments de base à prendre en compte"				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique caractérisation hydrogéologique du "bassin d'apport".				
Carte piézométrique pas demandées mais le sens d'écoulement et le gradient doivent être connus				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) A déterminer par pompages d'essais s'ils sont inconnus.				
Modèle maillé non				
Traçages non demandés				
Carte de vulnérabilité cartographie demandée, notamment en pollution diffuse et en pollution accidentelle				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution à inventorier (bibliographie et terrain)				
Diagnostic parcellaire occupation du sol				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 3A		Département 78	Commune(s) CC de Saint-Martin-la-Garenne	Direction de secteur DRIF
Intitulé de l'étude CCTP pour étude du bassin d'alimentation des captages et étude environnementale du champ captant de ST MARTIN LA GARENNE				
Année 02/12/1999	Réalisation CAMY (Communauté d'Agglomération de Mantes en Yvelines)		Maîtrise d'ouvrage Communauté d'Agglomération de Mantes en Yvelines	
Objectif(s) de l'étude évaluer la qualité de la ressource et ses variations possibles / évaluer les risques susceptibles d'altérer la qualité de l'eau				
Temps passé pas de délais imposés	Coûts	Partenaires Subvention AESN et CRIF (?)		
Type d'aquifère alluvions de la Seine + craie?				
Caractéristiques du ou des captage(s) 280 m3/h				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique coupes hydrogéologiques				
Carte piézométrique le rapport doit contenir deux cartes HE et BE				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé non				
Traçages non demandés				
Carte de vulnérabilité établir une carte des zones à risque (3 niveaux de hiérarchisation), basée sur l'occupation des sols et la "fragilité intrinsèque" de la nappe				
Etude des sols Carte pédologique et rôle du sol dans la fixation des polluants				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Diagnostic à conduire, en incluant les utilisations de produits phytosanitaires				
Sources de pollution Recensement des activités potentiellement polluantes. Inclure l'entretien des voiries				
Diagnostic parcellaire occupation du sol				
Plan d'actions propositions d'actions				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 3B		Département 78	Commune(s) CC de Buchelay et Rosny-sur-Seine	Direction de secteur DRIF
Intitulé de l'étude CCTP pour étude du bassin d'alimentation du champ captant de BUCHELAY et ROSNY-SUR-SEINE				
Année 27/04/2005	Réalisation CAMY (Communauté d'Agglomération de Mantes en Yvelines)		Maîtrise d'ouvrage	
Objectif(s) de l'étude				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 4		Département 10	Commune(s) Lesmont et Vericourt	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude étude des bassins d'alimentation des ressources actuelle et future du SIAEP de PINEY/LESMONT				
Année 23/07/2005	Réalisation BURGEAP	Maîtrise d'ouvrage SIAEP de PINEY/LESMONT		
Objectif(s) de l'étude présence d'atrazine et de déséthylatrazine au captage -> étude du BAC pour identifier l'origine et faire baisser les teneurs				
Temps passé 12 mois	Coûts 35200 euros	Partenaires		
Type d'aquifère Alluvial? / Craie?				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 5		Département 21	Commune(s)	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude étude de 3 bassins d'alimentation de captages de Côte d'Or (captage de GISSEY sous FLAVIGNY source des Baudouines)				
Année 01/01/2006	Réalisation SAFEGE	Maîtrise d'ouvrage		
Objectif(s) de l'étude				
Temps passé				
Coûts		Partenaires		
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 6		Département 51	Commune(s) Bouy	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Département de la Marne. District de la région de Mourmelon étude du Bassin d'alimentation du captage de BOUY indice national 159-1X-0002 Département de la marne				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/04/2002	GAUDRIOT	Communauté de Communes de la Région de Mourmelon		
Objectif(s) de l'étude Dégradation de la qualité des eaux captées, notamment en nitrates -> étude de vulnérabilité de l'ouvrage aux pratiques agricoles et au tracé du TGV Est				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère Craie sénonienne				
Caractéristiques du ou des captage(s) captage (puits) de Bouy - 18 m3/h en exploitation				
Méthode de délimitation du BAC Détermination de la zone d'influence du captage (Theis), puis de la zone d'appel par la méthode de Wyssling (isochrones 50, 100 et 200j). La zone d'étude retenue englobe les isochrones 100j voire 200j en fonction de la valeur retenue pour la porosité cinématique				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique hydrogéologie générale puis paramètres hydrogéologiques + rp de l'hydro agréé				
Carte piézométrique carte BRGM de 1966 (figure dans le rapport)				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) oui (biblio)				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non. Approche générale de la vulnérabilité de la craie				
Etude des sols Oui, sondages pédologiques				
Etude de la ZNS 4 profils azotés de la craie pr évaluer les vitesses de migration				
Pratiques agricoles enquête auprès des 15 agriculteurs de la zone d'étude				
Sources de pollution ligne TGV dans les PP rapproché et éloigné				
Diagnostic parcellaire cartes assolement et des sols nus en hiver				
Plan d'actions Propositions d'action, incluant l'abandon du captage. Fiches synthétiques des actions, dont subventions et aides				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 7		Département 51	Commune(s) Chalons-sur-Vesle	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Département de la Marne S.I.D.E.P. de CHENAY MERFY étude du Bassin d'alimentation du captage de CHALONS SUR VESLE indice national 131-4X-0061				
Année 01/02/2003	Réalisation GAUDRIOT	Maîtrise d'ouvrage SIDEPE Chenay-Merfy		
Objectif(s) de l'étude suite à dépassement de la norme AEP pour les pesticides, lancement d'une étude de vulnérabilité visant à préciser la nature des éventuelles sources de pollution.				
Temps passé	Coûts 9930€ dépensés sur 3575€	Partenaires AESN		
Type d'aquifère craie sénonienne. Développement d'une karstification (perte du ruisseau)				
Caractéristiques du ou des captage(s) 1 forage autorisé à 1200 m3/j				
Méthode de délimitation du BAC "Bassin versant: Il a été estimé à partir de la carte géologique locale et la carte IGN au 1/25000ème. Le bassin d'alimentation représente une surface d'environ 6 km²." Tracé des isochrones (cf. n°6 / méthode de Wyssling) puis délimitation proche des limites du bassin hydrographique, incluant les isochrones à 200j				
Surface du BAC 600 ha				
Etude hydrogéologique Hydrogéologie générale, essais de pompage, réalisation d'un piézomètre				
Carte piézométrique pas de carte piézométrique trouvée en bibliographie par le BE mais sens d'écoulement est connu				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) i connu d'après le rapport de l'hydrogéologue agréé. T connue sur trois ouvrages, S sur un piézomètre.				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non. Présentation des pratiques à risque (de par leur absence ou leur application)				
Etude des sols 156 sondages à la tarière. Carte pédologique au 1/25000 et typologie des sols.				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Enquête auprès des principaux viticulteurs et agriculteurs. Identification des produits phytosanitaires utilisés et des pratiques associées				
Sources de pollution pas d'activité industrielle, pas de stockage sur la zone d'étude. Observations sur les écoulements superficiels (associés à l'érosion des sols)				
Diagnostic parcellaire carte d'occupation des sols.				
Plan d'actions Propositions d'actions: administrative, techniques préventives (pratiques viticoles et agricoles, gestion des bassins de rétention), techniques curatives (gestion active des eaux), interconnexion				
Indicateurs oui. Essentiellement pour les aspects techniques				

Identifiant de l'étude 8A+8B		Département 58	Commune(s) Clamecy et Beuvron	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude Ville de CLAMECY étude des bassins d'alimentation des captages AEP rapport Phase 1 et 2				
Année 01/11/2005	Réalisation TAUW Environnement	Maîtrise d'ouvrage Ville de Clamecy		
Objectif(s) de l'étude Traitement de la turbidité et réduction des pollutions diffuses à la source. Pour cela, une étude des BAC est menée				
Temps passé	Coûts	Partenaires AESN		
Type d'aquifère Calcaires karstiques du Jurassique sous alluvions. Semi-captif				
Caractéristiques du ou des captage(s) Puits du Foulon (500 m3/j, équipé de 2 pompes fonctionnant en alternance - 61 et 78 m3/h) et source+puits de la Fontainerie (Q prélevé: 1130 m3/j)				
Méthode de délimitation du BAC Puits du Foulon: détermination du rayon d'influence, des paramètres de la zone d'appel (méthode non précisée) et de l'isochrone à 50j. Une "aire d'influence" est délimitée (pas un BACI), basée sur la géologie et la tectonique mais ne prend pas en compte la totalité de la zone d'appel (Clamecy). / Source de la Fontainerie: le bv topo est trop peu étendu par rapport au débit. La surface est estimée à partir du contexte hydrogéologique (pertes) et du rapport débit / Pluie utile				
Surface du BAC Puits du Foulon: environ 25 km² dont 7.5 km de cours d'eau / Source Fontainerie : le bv topographique fait 0.77 km² ce qui est bien trop faible par rapport au débit. Aire estimée de 7 km²				
Etude hydrogéologique percement de 2 piézomètres, nivellement, inspection caméra, profil des vitesses dans le puits. Profils de débit pour rechercher des pertes				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) essai de pompage, en complément de données bibliographiques (T, S)				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité carte de vulnérabilité des aquifères établie par le BRGM (échelle non précisée). Une carte de risques est dressée: la vulnérabilité intrinsèque (nature et épaisseur des recouvrements calcaires, nature des sols et proportion en éléments calcaires, présence de phénomènes liés à la karstification) est croisée avec les activités anthropiques potentiellement génératrices de pollution				
Etude des sols Carte pédologique de la CA de la Nièvre (échelle non précisée), complétée par 18 sondages à la tarière. Pas de carte des sols mais une carte de l'épaisseur des sols (3 classes).				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution recensement des ICPE (industriels et élevages). Assainissement				
Diagnostic parcellaire carte d'occupation des sols (à partir d'orthophotoplans et de visite(s) terrain)				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 8C		Département 58	Commune(s) Clamecy et Beuvron	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude Ville de CLAMECY étude BAC 6007104 Phase 3 (version finale)				
Année 21/03/2006	Réalisation TAUW Environnement	Maîtrise d'ouvrage Ville de Clamecy		
Objectif(s) de l'étude Traitement de la turbidité et réduction des pollutions diffuses à la source. Pour cela, une étude des BAC est menée				
Temps passé	Coûts	Partenaires AESN		
Type d'aquifère Calcaires karstiques du Jurassique sous alluvions. Semi-captif				
Caractéristiques du ou des captage(s) Puits du Foulon (500 m3/j, équipé de 2 pompes fonctionnant en alternance - 61 et 78 m3/h) et source+puits de la Fontainerie (Q prélevé: 1130 m3/j)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions oui, incluant le coût, il est présenté par captage et par aspect à traiter (turbidité, nitrates et produits phytosanitaires, environnement du captage)				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 9A		Département 95	Commune(s) Bray-et-Lû	Direction de secteur DRIF
Intitulé de l'étude Captage Pierre-Fiche (code BSS : 0125-7X-1001), Bray-et-Lû (95) - Etude du bassin versant d'alimentation du forage et des différentes origines de pollution - Rapport final de phase 1				
Année	Réalisation BURGEAP	Maîtrise d'ouvrage Syndicat Intercommunal et Interdépartemental des Eaux de la région de Bray-sur-Lu		
Objectif(s) de l'étude Diagnostic du BAC pour préserver et restaurer la qualité de l'eau				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère Craie sénonienne sous couverture alluviale (nappe en charge sous tourbe, sinon libre)				
Caractéristiques du ou des captage(s) Débit prélevé 600 m3/j. Essai de pompage à 76.5 m3/h				
Méthode de délimitation du BAC Basée sur la superficie nécessaire pr obtenir le Q prélevé avec une alimentation par la pluie utile. P utile considérée de 5l/s/km², il faut donc 1.4 km². La surface est élargie pr tenir compte de la disparité de la craie et de son recouvrement... Sur le plateau tertiaire, les limites sont celles des crêtes topo.				
Surface du BAC 537 ha				
Etude hydrogéologique coupe hydrogéologique. Gradient (carte piezo?), essai de débit, prélèvements				
Carte piézométrique 2 puits et 7 niveaux de cours d'eau ont été mesurés. Pas de carte établie				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) K calculé à partir de la formule de Forcheimer (puits alimenté par le fond)				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols Carte pédologique de l'INRA				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Estimation des quantités de phyto utilisés en déterminant les rotations par expertise				
Sources de pollution inventaire des sources potentielles (dont eaux usées et pluviales + traitement des routes et espaces communaux)				
Diagnostic parcellaire à partir de photos aériennes de 2003 et de visites de terrain + RGA à l'échelle du canton.				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 9B		Département 95	Commune(s) Bray-et-Lû	Direction de secteur DRIF
Intitulé de l'étude Captage Pierre-Fiche (code BSS : 0125-7X-1001), Bray-et-Lû (95) - Etude du bassin versant d'alimentation du forage et des différentes origines de pollution - Rapport de phase 2				
Année 19/12/2006	Réalisation BURGEAP	Maîtrise d'ouvrage Syndicat Intercommunal et Interdépartemental des Eaux de la région de Bray-sur-Lu		
Objectif(s) de l'étude Diagnostic du BAC pour préserver et restaurer la qualité de l'eau				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère Craie sénonienne sous couverture alluviale (nappe en charge sous tourbe, sinon libre)				
Caractéristiques du ou des captage(s) Débit prélevé 600 m3/j. Essai de pompage à 76.5 m3/h				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité "vulnérabilité des sols au risque d'infiltration"				
Etude des sols				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Enquête auprès de 10 agriculteurs				
Sources de pollution enquête auprès de 3 communes, de la DDE et visite de trois sites identifiés comme potentiellement à risque				
Diagnostic parcellaire cartes de l'assolement 2005 et 2006				
Plan d'actions propositions d'actions, chiffrées avec précision réglementaire et liste des subventions sollicitables par action				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 11		Département 89	Commune(s) Migennes	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude Etude des bassins d'alimentation des captages d'eau potable de la commune de MIGENNES rapport définitif				
Année 17/03/2006	Réalisation Sciences Environnement	Maîtrise d'ouvrage Ville de Migennes		
Objectif(s) de l'étude Améliorer et sécuriser la prod d'eau potable				
Temps passé 18 mois	Coûts 70000 euros	Partenaires AESN		
Type d'aquifère Craie cénomaniennne (karst) et sables albiens				
Caractéristiques du ou des captage(s) Q production: 85 / 35 / 20 et 150 m3/h				
Méthode de délimitation du BAC Le bassin versant souterrain est proche du bassin versant de surface (cartes piezos); la fermeture amont est faite sur les crêtes topo et vérification de la surface obtenue basée sur Q captage et Peff supposée. Traçages confirment la délimitation				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique piezométrie pour la recherche des gradients et traçage pour la vitesse d'écoulement				
Carte piézométrique Hautes Eaux et Basses Eaux, à partir de 14 piezos				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) K à partir des traçages.				
Modèle maillé non				
Traçages 6 injections.				
Carte de vulnérabilité non mais identification des dolines et bétaires. Vulnérabilité importante (karst)				
Etude des sols étude pédologique (dont carte) de la Chambre d'Agriculture de l'Yonne				
Etude de la ZNS Non mais recherche des bétaires				
Pratiques agricoles Non détaillées mais figurent peut-être dans le rapport de la Chambre d'Agriculture de l'Yonne				
Sources de pollution visite terrain et traçage dans réseau pluviale pour rechercher des fuites éventuelles. Recensement des décharges				
Diagnostic parcellaire carte d'assolement de 2004.				
Plan d'actions fiche d'actions par captage				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 12		Département 89	Commune(s) Poilly-sur-Tholon	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude Etude du bassin d'alimentation du puits de captage en eau potable des LATTEUX de BLEURY rapport définitif (commune de POILLY SUR THOLON)				
Année 01/07/2006	Réalisation Sciences Environnement	Maîtrise d'ouvrage Ville de Poilly-sur-Tholon		
Objectif(s) de l'étude Améliorer et sécuriser la prod d'eau potable				
Temps passé 2 ans	Coûts 37335 euros	Partenaires		
Type d'aquifère sables albiens				
Caractéristiques du ou des captage(s) Forage de 12 m3/h en production. Capacité de 18.8 m3/h				
Méthode de délimitation du BAC Calcul d'un rayon d'influence pour un pompage de 6h15 (pour AEP). Le BAC est défini qualitativement à partir des relevés piézométriques et des traçages effectués. Il inclut notamment une source à l'amont du forage qui induit une réinfiltration des sables à son aval (la source draine les eaux du Cénomaniens).				
Surface du BAC 210 ha				
Etude hydrogéologique Pompages par paliers, "longue durée", carte piezo, traçages, ...				
Carte piézométrique Réalisée en 1966 (mais avec des approximations). Mise en place de 6 piézomètres et cartes HE et BE. Gradient déduit				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) Pompage de 6 heures suivi sur plusieurs piézomètres. Calcul de T et S puis K à partir de l'épaisseur mouillée				
Modèle maillé non				
Traçages dans les sables à proximité du forage et dans le Cénomaniens (calcaires? Craie?) plus à l'amont.				
Carte de vulnérabilité utilisation de l'indicateur INDIGO pour évaluer le risque de lessivage des nitrates. La pédologie est prise en compte pour l'établissement de la carte de vulnérabilité				
Etude des sols étude pédologique de la CA de l'Yonne				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Enquête terrain réalisée par la CA de l'Yonne auprès des 11 agriculteurs du BAC. Détermination des rotations				
Sources de pollution étude réalisée par la CA de l'Yonne				
Diagnostic parcellaire étude réalisée par la Chambre d'Agriculture de l'Yonne: assolement 2003 / 2004 / 2005				
Plan d'actions oui, en matière agricole (étude CA de l'Yonne). Les coûts sont évalués et les aides mobilisables sont indiquées				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 13		Département 51	Commune(s) Courcy	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Captage d'alimentation en eau potable de COURCY (MARNE) étude du bassin d'alimentation				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/10/2001	ANTEA	AESN		
Objectif(s) de l'étude Evaluation des préconisations effectuées dans le cadre des PP et compréhension de l'origine et de la propagation des pollutions diffuses				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
	27637,48 euros	AESN		
Type d'aquifère Craie sénonienne				
Caractéristiques du ou des captage(s) Forage. Qmax 73 m ³ /h. Qprod 35 m ³ /h				
Méthode de délimitation du BAC Le BAC est défini à partir de la piezométrie pour la nappe libre et en se basant sur les crêtes topographiques pour la partie captive (en l'absence de données). Form. Tertiaires et perméables alimentent par percolation ou débordement puis infiltration. La contribution de la zone influencée par le captage à l'aval est considérée comme négligeable. Vérification sommaire à partir des volumes captés et renouvelables (?)				
Surface du BAC 490 ha				
Etude hydrogéologique réalisation de 2 piezos et de 2 sondages tarières				
Carte piézométrique oui en décembre 2000				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) T, K, S à proximité des ouvrages				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité définie à partir de la géologie et de la ZNS, de la nature des sols, de la couverture végétale et de l'environnement humain.				
Etude des sols Carte pédologique réalisée par la Chambre d'Agriculture de la Marne				
Etude de la ZNS 2 sondages de 5.5 et 6.5 m avec prélèvement tous les mètres (SO ₄ , NO ₃ , Na, Cl, phyto)				
Pratiques agricoles Pas d'enquête mais identification des produits et de l'origine des nitrates				
Sources de pollution inventaire des principales sources				
Diagnostic parcellaire carte d'assolement février-mars 2001 par CA Marne dans la zone d'influence du captage.				
Plan d'actions Propositions d'actions pour lutter contre les pollutions diffuses. Indication de la législation et des programmes existants				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 14		Département 51	Commune(s) Somme-Vesle	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Etude du bassin d'alimentation du captage du Syndicat des eaux de Somme - Vesle - Courtisols (51)				
Année 01/02/2004	Réalisation ANTEA	Maîtrise d'ouvrage Syndicat des eaux de Somme - Vesle - Courtisols		
Objectif(s) de l'étude Etude environnementale du BAC pour élaborer des projets d'actions visant à l'amélioration de la protection des captages AEP				
Temps passé	Coûts	Partenaires DDAF		
Type d'aquifère Craie sénonienne				
Caractéristiques du ou des captage(s) Forage. 200000 m3 / an. Qmax supérieur à 100 m3/h.				
Méthode de délimitation du BAC La délimitation a été effectuée à partir de la piézométrie				
Surface du BAC 1360 ha				
Etude hydrogéologique description du point de captage (T,S...)				
Carte piézométrique 2 cartes piézométriques de 1966 et décembre 1992 (1/100000). Nouvelle carte générée à partir de ces deux-là.				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) T et S au niveau du captage				
Modèle maillé non				
Traçages un traçage réalisé en 1995 sur le ruisseau de la Cassine, démontrant une circulation à une vitesse de 25 m/j environ				
Carte de vulnérabilité oui, à partir de la géologie, de la pédologie, de l'épaisseur de la ZNS, de la topographie et de l'environnement naturel et humain				
Etude des sols Cartographie (à l'échelle du BAC) basée sur une étude de terrain réalisée en décembre 2003. Typologie des sols				
Etude de la ZNS Non. Une valeur de 0.5 m/an est juste citée pour l'infiltration en domaine crayeux				
Pratiques agricoles Quatre exemples d'apports en engrais et de rotations des cultures sont fournis				
Sources de pollution inventaire des sources potentielles agricoles, industrielles (inexistantes) et urbaines				
Diagnostic parcellaire basé sur une visite terrain en décembre 2003 complétée par un questionnaire envoyé aux agriculteurs				
Plan d'actions définition d'actions pour lutter contre les pollutions diffuses: boisement, CIPAN, jachères, enherbement, maîtrise foncière, gel de l'irrigation				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 15		Département 51	Commune(s) Chalons-en-Champagne	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Etude du bassin d'alimentation du champ captant de production d'eau potable ville de CHALONS EN CHAMPAGNE				
Année 10/10/2002	Réalisation BURGEAP	Maîtrise d'ouvrage Ville de Chalons-en-Champagne		
Objectif(s) de l'étude Détection d'atrazine et métabolites à un seuil dépassant la norme de potabilité: la DDASS indique la nécessité d'un diagnostic sur leur origine et la mise en œuvre d'un programme d'amélioration et de préservation				
Temps passé 2 ans	Coûts 50000 euros	Partenaires		
Type d'aquifère Craie sénonienne (forages) et nappe alluviale de la Marne (puits). Craie localement captive, sinon en continuité hydraulique avec les alluvions				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 batteries d'ouvrages: A = 33 puits produisant 700 à 720 m ³ /h / B = 3 puits à drains rayonnants de 400 m ³ /h chacun / C = 2 forages captant la craie équipés d'une pompe de 400 ou de 450 m ³ /h				
Méthode de délimitation du BAC Le bassin d'alimentation du CC a été défini suite à la modélisation (détails non fournis). A l'intérieur du BAC, la zone d'appel est précisée.				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique éléments généraux, essai de pompages, prélèvements pour analyses				
Carte piézométrique Carte au 1/100000 et niveaux mesurés en janvier 2001				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) Pompage d'essai pour ouvrage dans la craie: T (0.69 m ² /s), S. Suivi des alluvions				
Modèle maillé MODFLOW. Modélisation bi-couche calée en permanent et en transitoire sur 23h (essai de pompage)				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité croisement multicritère sous SIG: 1/ caractéristiques de la couverture pédologique (texture, épaisseur, réserve hydrique) 2/ épaisseur de la ZNS (piezo et topo au 1/100000) 3/ éloignement du réseau hydrographique (pente non prise en compte). Les trois notes sont sommées. Carte au 1/100000				
Etude des sols Carte pédologique au 1/50000: 6 types de sols. Epaisseur des alluvions sur 42 sondages -> interpolation sous SIG pour cartographier la zone alluviale				
Etude de la ZNS Epaisseur de la ZNS estimée au 1/100000				
Pratiques agricoles Enquête par questionnaires auprès des agriculteurs concernés. Données RGA (1970 à 2000). Pratiques de fertilisation, protection phytosanitaire des cultures				
Sources de pollution Recensement des sites industriels, stations service, dépôts d'hydrocarbures, de produits phytosanitaires ou d'engrais, assainissement, utilisation non agricole de phytosanitaires				
Diagnostic parcellaire carte de l'occupation des sols dans le PPE (CA de la Marne, mars 2000)				
Plan d'actions oui				
Indicateurs oui: suivi de l'avancement du plan d'actions et suivi de son efficacité				

Identifiant de l'étude 16		Département 10	Commune(s) Chamoy Saint-Phal	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude Etude du bassin d'alimentation du captage du SIAEP de Chamoy Saint Phal version finale				
Année 15/04/2004	Réalisation BURGEAP	Maîtrise d'ouvrage SIAEP de Chamoy Saint Phal		
Objectif(s) de l'étude Diagnostic de la pollution du captage de Chamoy / Saint Phal par les produits phytosanitaires et définitions d'actions préventives ou curatives pour satisfaire aux exigences de qualité imposées par la législation				
Temps passé 18 mois	Coûts 24000 euros	Partenaires		
Type d'aquifère Craie du Cénomanién				
Caractéristiques du ou des captage(s) Qouvrage: de 90 à 95 m3/h. Q exploitation: 200 m3/j				
Méthode de délimitation du BAC Détermination à partir de la piézométrie et de la topo. (correspondance des crêtes piézométriques et topographiques sur la carte piezo). Utilisation de la méthode de Wyssling pour déterminer l'aire théorique d'alimentation du captage à partir de l'infiltration supposée (supposée égale aux pluies efficaces)				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique éléments généraux sur le fonctionnement de l'aquifère				
Carte piézométrique Cartes Hautes Eaux et Basses Eaux au 1/100000 du BRGM.				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) estimation du gradient à partir des cartes piezos. T connu par pompages d'essai				
Modèle maillé non				
Traçages non (turbidité non détectée sur l'ouvrage)				
Carte de vulnérabilité basée sur l'épaisseur du sol et sur sa texture. Cartographie SIG à partir de ces deux critères				
Etude des sols Carte pédologique au 1/25000 par la CA de l'Aube. Typologie des sols.				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Questionnaire auprès des agriculteurs.				
Sources de pollution dont les aménagements à prévoir (autoroute)				
Diagnostic parcellaire évolution de l'occupation des sols de puis 1970.				
Plan d'actions Actions proposées décomposées en curatif (1), préventif (5) et suivi (1). Les actions portent sur les aspects phytosanitaires et nitrates. Chiffrage et indication des subventions sollicitables par action				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 17A		Département 76	Commune(s) Saint-Antoine-la-Forêt	Direction de secteur DSAv
Intitulé de l'étude SIDEDA de Bolbec - Gruchet le Valasse Réalisation d'une étude de protection des captages de ST MARCEL et ST ANTOINE LA FORET afin de définir des mesures préventives pour lutter contre la turbidité et les produits phytosanitaires observés aux captages CCTP				
Année	Réalisation GINGER ENVIRONNEMENT 28 CHARTRES	Maîtrise d'ouvrage Syndicat Intercommunal d'eau et d'assainissement (SIDEDA) de Bolbec Gruchet le Valasse		
Objectif(s) de l'étude 1/ réaliser un "état zéro" 2/ définir précisément les BAC 3/ Effectuer un diagnostic complet des problèmes de qualité aux captages 4/ analyser les risques de pollution, identifier les zones prioritaires d'actions et proposer un plan d'actions				
Temps passé durée maximum de 6 mois	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère Craie sénonienne, karst				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC A délimiter "précisément", en recensant les nouvelles zones d'infiltration préférentielle des eaux par une enquête de terrain et en analysant leurs relations probables avec les captages d'eau.				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique mise en évidence du rôle joué par les réseaux karstiques dans la propagation des pollutions / analyse poussée de la turbidité et des pollutions associées / détermination des relations avec le cours d'eau				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé non				
Traçages des traçages peuvent être proposés par le BE				
Carte de vulnérabilité à déterminer à partir de "la profondeur de l'aquifère, la nature et l'épaisseur de la couverture de la zone non saturée, les vitesses de transfert depuis la surface jusqu'à la source, les pertes, les axes de drainage..."				
Etude des sols Le BE doit "définir les secteurs sensibles aux transferts de surface, à l'érosion et aux infiltrations préférentielles".				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles oui				
Sources de pollution à inventorier et à localiser				
Diagnostic parcellaire occupation des sols, à cartographier selon une méthode à déterminer par le BE				
Plan d'actions à établir, avec coût / avantage / inconvénient				
Indicateurs indicateurs d'évaluation des actions				

Identifiant de l'étude 17B		Département 76	Commune(s) Saint-Antoine-la-Forêt	Direction de secteur DSAv
Intitulé de l'étude SIDEDA de Bolbec - Gruchet le Valasse rapport de fin de Phase 1 synthèse des données générales. Réalisation d'une étude de protection des captages de ST MARCEL et ST ANTOINE LA FORET				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
16/09/2005	GINGER ENVIRONNEMENT 28 CHARTRES	Syndicat Intercommunal d'eau et d'assainissement (SIDEDA) de Bolbec Gruchet le Valasse		
Objectif(s) de l'étude 1/ réaliser un "état zéro" 2/ définir précisément les BAC				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère craie sénonienne, karst				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 forages à Saint-Marcel (Qprod cumulé: 390 m3/h) et 1 puits à Saint-Antoine-la-Forêt (2 pompes de 80 et 100 m3/h fonctionnant alternativement)				
Méthode de délimitation du BAC Le BAC a été délimité à partir de la carte piézométrique (3 km²) sans tenir compte d'une alimentation par la nappe alluviale. Surface estimée par le débit pompé: 6 à 7km². -> le BE prend en compte des échanges nappe-rivière et fait référence à l'ensemble du bv du Bolbec (122 km²)				
Surface du BAC 3 km² sur la base de la piézométrie, 6 à 7 km² sur la base du débit pompé et 122 km² en prenant en compte une alimentation par la rivière (tout son bv). La conclusion de l'étude indique que le BAC couvre une surface de 3 km².				
Etude hydrogéologique Hydrogéologie générale à partir des éléments bibliographiques. Discussion sur la relation nappe-rivière (sens du drainage). Inspection camera, étude isotopique				
Carte piézométrique carte de l'atlas hydrogéologique de Seine-Maritime et carte du BE Ingetec (échelles non trouvées)				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) T et S issus des essais de pompage.				
Modèle maillé non				
Traçages réalisés en 1997				
Carte de vulnérabilité la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère a été estimée à partir de deux éléments: la nature et l'épaisseur du recouvrement crayeux (à partir de la carte géologique) et l'épaisseur de la ZNS. Carte au 1/80000 qui ne prend pas en compte les circulations spécifiques au karst				
Etude des sols Non. Prise en compte des formations superficielles à partir de la carte géologique				
Etude de la ZNS Epaisseur de la ZNS déterminée sous SIG par différence entre le MNT et une piézométrie "moyenne" (étude antérieure)				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution identification des ouvrages de rétention d'eaux pluviales, des indices de cavités souterraines et de puits d'infiltration, des exploitations agricoles, Z.I. et zones urbanisées. Gazoduc, voies ferrées, route départementale. Cartographie au 1/25000				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 17C		Département 76	Commune(s) Saint-Antoine-la-Forêt	Direction de secteur DSAv
Intitulé de l'étude SIDEDA de Bolbec - Gruchet le Valasse rapport de Phase 2 diagnostic des ouvrages de captage. Réalisation d'une étude de protection des captages de ST MARCEL et ST ANTOINE LA FORET (rapport N°2 version 1)				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
09/11/2005	GINGER ENVIRONNEMENT 28 CHARTRES	Syndicat Intercommunal d'eau et d'assainissement (SIDEDA) de Bolbec Gruchet le Valasse		
Objectif(s) de l'étude 3/ Effectuer un diagnostic complet des problèmes de qualité aux captages // Etude de la turbidité et essai de bilan hydrologique				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère craie sénonienne, karst				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 forages à Saint-Marcel (Qprod cumulé: 390 m3/h) et 1 puits à Saint-Antoine-la-Forêt (2 pompes de 80 et 100 m3/h fonctionnant alternativement)				
Méthode de délimitation du BAC La surface du BAC est utilisée comme variable pour ajuster le bilan hydrologique (en se basant sur une répartition homogène d'une lame d'eau infiltrante)				
Surface du BAC de 3 à 6.4 km². Les investigations sont effectuées sur une surface de 6 km²				
Etude hydrogéologique bilan hydrologique sur les années 2000 à 2004. Etude statistique de la turbidité au droit des forages (fréquence et décalage avec la pluie et le débit du cours d'eau)				
Carte piézométrique non				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité Enquête terrain pour recenser les bétouilles, "les indices" (dépressions situées dans l'axe du thalweg), les ravines et les bassins d'infiltration. Cartographie				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution non				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 17D		Département 76	Commune(s) Saint-Antoine-la-Forêt	Direction de secteur DSAv
Intitulé de l'étude SIDEDA de Bolbec - Gruchet le Valasse rapport de Phase 2.2. climatologie, fonctionnement hydraulique occupation et utilisation du sol. Réalisation d'une étude de protection des captages de ST MARCEL et ST ANTOINE LA FORET (Rapport n°2.2 version 1)				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
19/12/2005	GINGER ENVIRONNEMENT 28 CHARTRES	Syndicat Intercommunal d'eau et d'assainissement (SIDEDA) de Bolbec Gruchet le Valasse		
Objectif(s) de l'étude 3/ Effectuer un diagnostic complet des problèmes de qualité aux captages // Enquête auprès des agriculteurs				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère craie sénonienne, karst				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 forages à Saint-Marcel (Qprod cumulé: 390 m3/h) et 1 puits à Saint-Antoine-la-Forêt (2 pompes de 80 et 100 m3/h fonctionnant alternativement)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC Les investigations sont effectuées sur une surface de 6 km²				
Etude hydrogéologique non				
Carte piézométrique non				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols Etablissement d'une carte des "risques d'érosion de sol", à partir des pentes, de la "position géomorphologique" (thalweg ou versant) et de l'occupation des sols. Les pentes sont générées à partir d'un MNT au pas de 50 m, interpolé (!) au pas de 5m.				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Enquête auprès des 8 agriculteurs du BAC. Liste des molécules utilisées et pratiques de pulvérisation.				
Sources de pollution non				
Diagnostic parcellaire enquête auprès des 8 agriculteurs du BAC de 6 km²: 6 réponses couvrant 83% de la SAU. Carte d'utilisation des sols (CORINE Land Cover et enquête terrain).				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 17E		Département 76	Commune(s) Saint-Antoine-la-Forêt	Direction de secteur DSAv
Intitulé de l'étude SIDEDA de Bolbec - Gruchet le Valasse rapport de Phase 3 version provisoire analyse des risques et propositions d'actions. Réalisation d'une étude de protection des captages de ST MARCEL et ST ANTOINE LA FORET (rapport N°4 version N°2)				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
19/12/2005	GINGER ENVIRONNEMENT 28 CHARTRES	Syndicat Intercommunal d'eau et d'assainissement (SIDEDA) de Bolbec Gruchet le Valasse		
Objectif(s) de l'étude 4/ analyser les risques de pollution, identifier les zones prioritaires d'actions et proposer un plan d'actions				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère craie sénonienne, karst				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 forages à Saint-Marcel (Qprod cumulé: 390 m3/h) et 1 puits à Saint-Antoine-la-Forêt (2 pompes de 80 et 100 m3/h fonctionnant alternativement)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique non				
Carte piézométrique non				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages Traçages réalisés en mars 2002. L'un des deux donne une vitesse d'écoulement de 100 m/h				
Carte de vulnérabilité par classement multicritères non pondéré (somme de classes notées de 0 à 4). Les bétaires sont prises en compte par leur distance aux captages et par le gradient de la nappe sur la distance bétaire-captage. Vulnérabilité par "classement multidimensionnel pondéré", basé sur deux groupe de bétaires: en lien avec les captages et celles qui ne le sont pas. Traitement de l'échantillon reconstitué par Analyse Factorielle Discriminante pour calculer les coefficients de la pondération				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution non				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions les propositions tournent autour des thématiques suivantes: relations nappe-ruisseau / optimisation de l'exploitation de la ressource aquifère / maîtrise des intrants agricoles / maîtrise du ruissellement et de l'érosion / traitement des bétaires / actualisation des PP. Chiffrage du coût des propositions				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 17F		Département 76	Commune(s) Saint-Antoine-la-Forêt	Direction de secteur DSAv
Intitulé de l'étude SIDEDA de Bolbec - Gruchet le Valasse rapport de Phase 3 - Propositions d'actions et hiérarchisation - Réalisation d'une étude de protection des captages de ST MARCLE et ST ANTOINE LA FORET (Rapport N 4.2 version N°5)				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
04/10/2006	GINGER ENVIRONNEMENT 28 CHARTRES	Syndicat Intercommunal d'eau et d'assainissement (SIDEDA) de Bolbec Gruchet le Valasse		
Objectif(s) de l'étude 4/ analyser les risques de pollution, identifier les zones prioritaires d'actions et proposer un plan d'actions				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère craie sénonienne, karst				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 forages à Saint-Marcel (Qprod cumulé: 390 m3/h) et 1 puits à Saint-Antoine-la-Forêt (2 pompes de 80 et 100 m3/h fonctionnant alternativement)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs "suivi et évaluation des actions entreprises": le BE propose l'équipement du BAC de matériel d'acquisition de données quantitatives et qualitatives				

Identifiant de l'étude 18		Département 50	Commune(s) Créances	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude ANTEA AEE - Etude de vulnérabilité, d'incidence et d'évaluation des risques de pollution -Forage de HOTOT à CREANCES				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/02/1999	ANTEA + BE Agriculture, Eau, Environnement de Lessay	SIAEP de Créances-Pirou		
Objectif(s) de l'étude Le captage est touché par une pollution nitratée et par des pesticides. Les PP ne sont pas définis. -> étude de vulnérabilité et évaluation des risques de pollution préalable à la définition des PP				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN, DDAF de la Manche		
Type d'aquifère Pliocène, nappe libre				
Caractéristiques du ou des captage(s) Exploitation à 60 m3/h				
Méthode de délimitation du BAC Le B.E. définit deux zones, l'une "proche" dite sensible dont la méthode de délimitation n'est pas précisée, l'autre "éloignée" qui "s'appuie principalement sur la ligne de partage des eaux de surface et qui est donc susceptible de représenter le BA et d'influence du forage". Une aire d'alimentation du forage avait été évaluée en 1985 à 250 ha				
Surface du BAC 1.68 km² (zone proche) et 4.74 km² (zone éloignée). Aire définie en 1985: 250 ha				
Etude hydrogéologique éléments généraux (incluant climatologie, hydrographie, topographie, photos aériennes...) et prospection géophysique (électromagnétique et sondages électriques). Identification d'un paléochenal				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) T, S, porosité, gradient				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité Définition de zones sensibles au travers de trois classes de pouvoir épurateur des sols. Cartographie				
Etude des sols Carte pédologique et du pouvoir épurateur des sols				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Carte des rotations agricoles. Estimation des apports organiques. Carte des bilans azotés par parcelle				
Sources de pollution inventaire des activités humaines susceptibles de polluer				
Diagnostic parcellaire enquête terrain et carte d'occupation des sols				
Plan d'actions recommandations				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 19		Département 14	Commune(s) Moult	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Département du Calvados SIAEP d'Argences commune de MOULT captage de PUNAY Synthèse hydrogéologique et environnementale préalable à la délimitation des périmètres de protection				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/06/1994	Bureau d'études Géologiques G. PIERSON (TOURS)	CG du Calvados		
Objectif(s) de l'étude étude préalable à la définition des PP				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère Bathonien				
Caractéristiques du ou des captage(s) Qcrit.: 120 m3/h / Q prod : 100 m3/h				
Méthode de délimitation du BAC Pas de délimitation du BAC.				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique éléments généraux. Hydrologie. + précis sur le captage				
Carte piézométrique oui, départementale				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) interprétation pompages d'essais				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité "carte d'aptitude des formations superficielles à retenir une pollution"				
Etude des sols Carte des formations superficielles (origine BRGM?) et carte pedo (avec sondages)				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Enquête CORPEN auprès de 6 exploitants				
Sources de pollution oui. Assainissement, trafic routier et ferroviaire, activités indus et artisanales, tourisme. Décharges, citernes de stockage. Carte.				
Diagnostic parcellaire carte du couvert végétal				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 20		Département 14	Commune(s) Zone du bassin de Saon	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Conseil général du Calvados / Hydrogéologie générale de l'aquifère du trias dans la région du sud Bessin (bassin de Saon) Etude géologique et pédologique				
Année 01/09/2000	Réalisation SOGREAH (A) + document DDASS (B)	Maîtrise d'ouvrage CG du Calvados		
Objectif(s) de l'étude fonctionnement de l'aquif du Trias (ds Bassin de Saon). Vulnérabilité pr protection captage				
Temps passé	Coûts	Partenaires AESN		
Type d'aquifère Trias				
Caractéristiques du ou des captage(s) Forage des Gosselines: 70 m3/h (essai)				
Méthode de délimitation du BAC Pas de délimitation du BAC par manque d'information. Carte vulnérabilité dressée sur la ressource et non sur "la ressource du forage des Gosselines"				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique piézométrie				
Carte piézométrique carte BE de 1973				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) uniquement au captage				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité Basée uniquement sur la géologie, les sols n'étant pas discriminants (perméables)				
Etude des sols Carte pédologique au 1/25000 suite à sondage à la tarière				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 21		Département 14	Commune(s) Arganchy	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Conseil général du Calvados / étude Hydrogéologique et d'environnement du bassin du forage d'ARGANCHY (Calvados)				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/02/2002	ANTEA	CG du Calvados		
Objectif(s) de l'étude étude hydrogéologique et d'environnement pour lutter contre la dégradation de la ressource				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère Trias gravelo-sableux. Nappe captive				
Caractéristiques du ou des captage(s) Q critique : 58 m3/h. Q exploitation: 45 m3/h				
Méthode de délimitation du BAC le BAC n'est pas délimité durant l'étude. L'étude a porté sur le "bassin topographique du captage"				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique 20 sondages électriques pour préciser la lithologie et la position du socle				
Carte piézométrique des mesures piézométriques sont effectuées pour déterminer le gradient hydraulique et le sens d'écoulement de la nappe				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) T et S au captage				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution identification des points singuliers: puits/forages abandonnés ou mal protégés, mare, carrière, dépôts.				
Diagnostic parcellaire carte d'occupation des sols après visite terrain: ZU, prairie, culture, bois ou vergers.				
Plan d'actions définition de 5 zones dans la zone d'étude, pour lesquelles une approche du risque de pollution en fonction de la lithologie du recouvrement et de l'occupation du sol. Propositions de mesures agro-environnementales (dont CTE)				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 22		Département 61	Commune(s) Sées	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Chambre d'agriculture de l'Orne Protection de la ressource en eau potable du SIAEP de SEES Etat des lieux des pratiques agricoles et repérage des points sensibles sur le bassin d'alimentation des captages SEES (captage de la Luzerne)				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/11/2000	Chambre d'agriculture de l'Orne			
Objectif(s) de l'étude état des lieux dans le BAC: environnement et repérage des points sensibles / assolements 1999, 2000 et 2001 / pratiques de fertilisation et traitement phytosanitaire				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère Bathonien				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 captages. Débits non précisés				
Méthode de délimitation du BAC Une carte du BAC est présentée mais aucune information n'est fournie sur la façon dont il a été délimité.				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique non				
Carte piézométrique non				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Drainage des parcelles et renvoi des eaux vers un fossé infiltrant. Dépôt de fumier. Rotations. Pratiques de fertilisation				
Sources de pollution puits abandonnés, ligne de chemin de fer, dépôts de déchets organiques				
Diagnostic parcellaire Assolement 1999, 2000 et 2001				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 23		Département 2	Commune(s) 5 communes concernées	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Délimitation des bassins d'alimentation des captages publics de MONFAUCON/MONTLEVON, PARGNY LA DHUYS, LA CHAPELLE-MONTHODON, COURTEMON-VARENNES (Aisne) avis de l'hydrogéologue agréé				
Année 01/09/2005	Réalisation M. Caudron, hydrogéologue agréé	Maîtrise d'ouvrage Communauté de communes du canton de CONDE EN BRIE		
Objectif(s) de l'étude délimitation des BAC, avis de l'hydrogéologue agréé				
Temps passé	Coûts	Partenaires AESN		
Type d'aquifère calcaire du Lutétien / Calcaire de Champigny karstifié / nappe alluviale				
Caractéristiques du ou des captage(s) 5 captages. source artésienne 30 m ³ /h / 12000 à 30000 m ³ /j / ? / ? / 12.5 l/s				
Méthode de délimitation du BAC A partir des crêtes piézométriques lorsqu'il existe une carte piézo ou, par défaut, à partir du bassin hydrographique. Prise en compte du fonctionnement hydrogéol (drainage, relation nappe-rivière). Estimation de l'aire d'alimentation à partir du débit				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique éléments généraux, Peff				
Carte piézométrique non citée				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages oui pour les sources de la Dhuis				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution non				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 24A		Département 51	Commune(s) Taissy / Puisieulx (CC de Couraux)	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Synthèse des données nécessaires à l'étude du bassin d'alimentation du champ captant de COURAUX Proposition du déroulement des investigations dans le cadre de cette étude. Communes de TAISSY et PUISIEULX (Marne)				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/08/2006	CALLIGEE HYDRIAD VOLUME 1	SIABAVE: Syndicat Mixte Intercommunal d'Aménagement du Bassin de la Vesle		
Objectif(s) de l'étude améliorer la connaissance du CC pour reconquérir la qualité de la ressource				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère craie sous alluvions				
Caractéristiques du ou des captage(s) CC de Couraux: 10 forages. 10 à 15000 m3/j. Pompe de 250 m3/h pour chaque ouvrage				
Méthode de délimitation du BAC Par modélisation, en imposant différentes contraintes sur la relation nappe de la craie / Vesle.				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique +++ , notamment les parties geol, pédo. Et hydrogeol. Bref, tout le rapport est excellent				
Carte piézométrique 4 cartes et des données bibliographiques visant à préciser les écoulements				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) données biblio, dont celles du CC (Tmoy: 0.31 m ² /s, S<1%). Paramètres hydrodispersifs				
Modèle maillé Un modèle simplifié a été réalisé, en pré-modèle. Le modèle sera fait en phase 2				
Traçages données bibliographiques				
Carte de vulnérabilité oui, 2 cartes issues de la bibliographie et considérations générales, puis détaillées				
Etude des sols pas de carte pédologique disponible mais caractérisation des différents types de sols. Constat de la nécessité d'une cartographie				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Oui, de façon détaillée				
Sources de pollution activités industrielles, voies de circulation, terrains remblayés, plan d'eau, "points noirs"				
Diagnostic parcellaire pas de carte d'occupation des sols				
Plan d'actions indication sur le type de modélisation à réaliser, les programmes en cours et les données complémentaires nécessaires				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 24B		Département	Commune(s)	Direction de secteur
		51	Taissy / Puisieux (CC de Couraux)	DVM
Intitulé de l'étude				
Synthèse des données nécessaires à l'étude du bassin d'alimentation du champ captant de COURAUX Proposition du déroulement des investigations dans le cadre de cette étude. Communes de TAISSY et PUISIEUX (Marne)				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/08/2006	CALLIGEE HYDRIAD VOLUME 2	SIABAVE: Syndicat Mixte Intercommunal d'Aménagement du Bassin de la Vesle		
Objectif(s) de l'étude				
améliorer la connaissance du CC pour reconquérir la qualité de la ressource				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère				
craie sous alluvions				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
CC de Couraux: 10 forages. 10 à 15000 m3/j. Pompe de 250 m3/h pour chaque ouvrage				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 25		Département 21	Commune(s) Gissey-sous-Flavigny	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude Etude de 3 BAC de Cote d'Or - captage de Gissey-sous-Flavigny : source des Baudouines				
Année 01/01/2006	Réalisation SAFEGE	Maîtrise d'ouvrage DDAF21		
Objectif(s) de l'étude Teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l -> étude du BAC pour identifier l'origine et faire baisser les teneurs				
Temps passé	Coûts	Partenaires AESN?		
Type d'aquifère Bajocien, domaine karstique				
Caractéristiques du ou des captage(s) source. Débit non estimé!				
Méthode de délimitation du BAC La méthode de délimitation n'est pas indiquée. Les failles sont citées comme facteur limitant				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique éléments généraux. Climatologie. Pas de données quantitatives sur la source captée				
Carte piézométrique non				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non, éléments généraux sur les différents facteurs (topo, géologie, pédologie, drainages préférentiels et infiltration)				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution conduite eaux usées (non localisée), routes et chemins, déboisement, couvert végétal				
Diagnostic parcellaire carte du couvert végétal				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 26		Département 21	Commune(s) Saint-Germain-lès-Senailly	Direction de secteur DSAM
Intitulé de l'étude Etude de 3 BAC de Cote d'Or - captage de Saint-Germain-lès-Senailly : puits Bricard				
Année 01/01/2006	Réalisation SAFEGE	Maîtrise d'ouvrage DDAF21		
Objectif(s) de l'étude Teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l -> étude du BAC pour identifier l'origine et faire baisser les teneurs				
Temps passé	Coûts	Partenaires AESN?		
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s) puits. 2 pompes de 8.5 m3/h chacune.				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 27		Département 78	Commune(s) CC de Saint-Martin-la-Garenne	Direction de secteur DRIF
Intitulé de l'étude Communauté d'agglomération de Mantes en Yvelines Etude hydrogéologique du champ captant d'eau potable de Saint Martin la Garenne				
Année 18/02/2005	Réalisation HYDROEXPERT	Maîtrise d'ouvrage CAMY		
Objectif(s) de l'étude Accroître la capacité du CC pour fournir 30000 m3/j de plus: vulnérabilité et protection de la ressource à étudier				
Temps passé	Coûts	Partenaires AESN		
Type d'aquifère craie sénonienne + alluvions de la Seine				
Caractéristiques du ou des captage(s) CC de St Martin la Garenne. 250 m3/h unitaire				
Méthode de délimitation du BAC L'extension du modèle a été limitée au bassin versant souterrain, dont les limites amont (dans le tertiaire) sont supposées correspondre avec le bv de surface. Pas de BAC. Les isochrones à 100 et 50j ont été définies				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique fonctionnement hydrogeol, Peff et recharge spatialisée (zonage sommaire basé sur la geologie)				
Carte piézométrique oui (campagne piézométrique du 11/01/2005 et références biblio). Utilisées pour le calage en permanent				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) T, K, Kv. 1 essai de pompage. Porosité efficace estimée				
Modèle maillé Modèle aux volumes finis: TALISMAN. Bicouche. En permanent				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non mais 6 simulations de propagation d'un polluant (uniquement hydrodynamique)				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution 6 simulations ont été effectuées à partir de scenarii de pollution prédéfinis.				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions mise en place de piezomètres et de qualitomètres. Proposition de délimitation du PPR (basé sur isochrones 50j)				
Indicateurs non mais piezomètres et qualitomètres				

Identifiant de l'étude 28		Département 76	Commune(s)	Direction de secteur DSAv
Intitulé de l'étude l'étude "phyto" d'Auffay Tôtes				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
Objectif(s) de l'étude				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 29		Département 77	Commune(s) Vulaines-sur-Seine	Direction de secteur DRIF
Intitulé de l'étude Etude de Bassin d'Alimentation des Captages AEP de Vulaines-sur-Seine (La Touffe 1 et 2) et Héricy				
Année 01/11/2006	Réalisation SAFEGE	Maîtrise d'ouvrage Communauté de Communes de Fontainebleau-Avon		
Objectif(s) de l'étude étude du BAC de Héricy et la Touffe pour préparer la protection des captages AEP				
Temps passé	Coûts	Partenaires AESN?		
Type d'aquifère calcaires de Champigny, souvent karstifiés				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 captages équipés au débit de 90 m ³ /h, 140 m ³ /h et 135 m ³ /h; Fiches signalétiques				
Méthode de délimitation du BAC Trois délimitations, basées sur les cartes piezo de 1967 et 2004 et sur le toit du Champigny. Calcul des isochrones à partir de la méthode de Wyssling				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique détaillée au niveau des ouvrages				
Carte piézométrique 1967 et 2004. Critique sur le nombre de points pour la zone et la question de l'échelle				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) essais de pompage mais pas de calcul de T. Valeurs régionales de T et de porosité efficace				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité vulnérabilité intrinsèque de la nappe, basée sur l'épaisseur du recouvrement et la géologie. La méthode n'est pas détaillée précisément.				
Etude des sols A partir d'une cartographie au 1/250000. Typologie des sols				
Etude de la ZNS Cartographie - a priori SIG - de l'épaisseur du recouvrement des calcaires				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution CPE, assainissement individuel, STEP, zones d'épandage des boues de STEP, voies de communication, activité agricole				
Diagnostic parcellaire occupation des sols (Corine Land Cover) + POS. Relevé terrain en mars 2006. Localisation des ZNIEFF et ZICO				
Plan d'actions propositions d'actions, dont améliorer la connaissance hydrogéologique (inventaire sources et points d'eau, carte piézométrique, modèle local de nappe). 14 fiches d'action, avec budget et chronogramme. Les subventions sollicitables ont été définies. Plan de suivi, incluant les temps de suivi des différentes actions				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 30		Département 14	Commune(s)	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude CCTP / Syndicat mixte de production d'eau potable de la région de Caen. Etude préalable à la définition de programmes de restauration et de préservation de la qualité des ressources en eau exploitées dans la région de Caen. 3 lots				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/05/2006	Syndicat mixte de production d'eau potable de la région de Caen.	Syndicat mixte de production d'eau potable de la région de Caen		
Objectif(s) de l'étude "élaboration de programmes d'action (...) pour la reconquête de la qualité de l'eau."				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
1 an maximum				
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC la délimitation des BAC n'est pas demandée dans le CdC. Les PP sont eux à prendre en compte.				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité oui, vulnérabilité intrinsèque				
Etude des sols oui				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Enquête sur les pratiques de fertilisation et d'utilisation des produits phytosanitaires				
Sources de pollution inventaire des usages agricoles et non agricoles des engrais et des produits phytosanitaires				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions oui				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 31		Département 60	Commune(s) Chaumont-en-Vexin	Direction de secteur DVO
Intitulé de l'étude CCTP / DDAF de l'Oise. Etude du bassin d'alimentation du captage d'alimentation en eau potable de Chaumont-en-Vexin				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/02/2007	DDAF de l'Oise	Commune de Chaumont-en-Vexin		
Objectif(s) de l'étude "Identifier de façon approfondie les sources potentielles de pollutions liées aux activités sur le BAC (...), à proposer des actions pour les réduire et les maîtriser				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC "la délimitation du BAC (...) a déjà été réalisé sous l'égide de la CC du Vexin-Thelle dans le cadre du Contrat Territorial pour l'Eau." Fait par B. Pomerol, hydrogéologue agréé en septembre 2000				
Surface du BAC 838 ha				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 32		Département 60	Commune(s) 17 communes concernées	Direction de secteur DVO
Intitulé de l'étude les bassins d'alimentation des captages AEP: bassins des Trois-doms, de l'Aronde, de l'Arré et de la Brèche				
Année	Réalisation B. Pomerol, hydrogéologue agréé	Maîtrise d'ouvrage		
Objectif(s) de l'étude délimitation des BAC?				
Temps passé	Coûts	Partenaires ?		
Type d'aquifère craie sénonienne				
Caractéristiques du ou des captage(s) 22 captages. Caractéristiques non indiquées				
Méthode de délimitation du BAC Non indiquée				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique introduction hydrogéologique				
Carte piézométrique il n'en est pas fait mention				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution non				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 33		Département 51	Commune(s) Taissy / Puisieux (CC de Couraux)	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Champ captant de Couraux - Diagnostic de la contamination de la nappe en vue de l'élaboration de mesures de protection de la ressource en eau				
Année 01/07/1998	Réalisation Anjou Recherche	Maîtrise d'ouvrage SIABAVE: Syndicat Mixte Intercommunal d'Aménagement du Bassin de la Vesle		
Objectif(s) de l'étude				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 34		Département 2	Commune(s) 5 communes concernées	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Communauté de Communes de la région de Château-Thierry - Délimitation des bassins d'alimentation des captages publics de Coigny-l'Abbaye, Rocourt-Saint-Martin, Mont-Saint-Père, du champ captant de la plaine de la Marne à Essômes-sur-Marne et de Nogentel				
Année 01/12/2003	Réalisation M. Caudron, hydrogéologue agréé	Maîtrise d'ouvrage Communauté de Communes de la région de Château-Thierry		
Objectif(s) de l'étude Délimitation des bassins d'alimentation				
Temps passé ?	Coûts ?	Partenaires AESN		
Type d'aquifère Calcaires du Lutétien, sables du Cuisien et alluvions de la Marne				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 sources, 1 puits et 1 CC constitué de puits				
Méthode de délimitation du BAC en l'absence de données piézométriques, la délimitation est basée sur la géologie, la topographie et le fonctionnement hydrogéologique supposé				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique éléments généraux				
Carte piézométrique pas de carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution non				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 35		Département 51	Commune(s) Vincelles	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Etude du bassin d'alimentation des captages de Vincelles (51)				
Année 01/04/2002	Réalisation BURGEAP	Maîtrise d'ouvrage Commune de Vincelles		
Objectif(s) de l'étude Préciser les bilans de fonctionnement hydrogéologique pour orienter l'action agri-environnementale. Le rapport est établi dans le cadre d'une étude pilote portant sur trois sites.				
Temps passé	Coûts 44860,17 euros	Partenaires AESN		
Type d'aquifère Craie sénonienne sous sables thanétiens sous alluvions de la Marne				
Caractéristiques du ou des captage(s) 300 m ³ /j répartis sur 2 forages				
Méthode de délimitation du BAC Par la simulation numérique, en supposant que la Marne est relativement colmatée. La zone d'influence est cartographiée. Elle s'étend des deux côtés de la Marne. Tracé des isochrones à 50, 100 et 200j				
Surface du BAC 100 ha environ				
Etude hydrogéologique Réalisation de deux piézomètres. Profil de conductivité dans un forage. Prélèvements, mesures in situ de la conductivité, de la température et du niveau statique				
Carte piézométrique Il n'est pas fait mention de cartes piézométriques				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) Evaluation de la perméabilité et de la transmissivité à partir des données existantes				
Modèle maillé Modèle maillé, à potentiel imposé pour la Marne. Les conditions de calage sont inconnues				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Envoi de deux questionnaires, l'un aux vignerons, l'autre aux agriculteurs. Description des pratiques de fertilisation azotée. Recensement des matières actives.				
Sources de pollution Enquête auprès des utilisateurs non agricoles des produits phytosanitaires				
Diagnostic parcellaire Cartes d'assolement de 1996-97 à 1999-2000 sur la zone des périmètres de protection rapprochés				
Plan d'actions 7 actions visant principalement à réduire les teneurs en pesticides dans les eaux captées. Les coûts et subventions mobilisables sont décrits. Hiérarchisation des actions et de leur difficulté de mise en œuvre				
Indicateurs Indicateurs d'avancement et d'efficacité du plan d'actions. Evaluation de l'impact des propositions par un bilan massique (type modèle global)				

Identifiant de l'étude 36		Département 51	Commune(s) Taissy / Puisieux (CC de Couraux)	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Programme pour l'amélioration de la qualité de l'eau du champ captant de Couraux (51) - Synthèse des études menées sur le bassin versant du champ captant de Couraux - Rapport intermédiaire				
Année 01/06/2002	Réalisation FREDONCA	Maîtrise d'ouvrage		
Objectif(s) de l'étude				
Temps passé				
Coûts				
Partenaires				
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 37		Département 51	Commune(s) Taissy / Puisieux (CC de Couraux)	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Synthèse des études menées sur le bassin versant du champ captant de Couraux (Marne)				
Année 02/06/2002	Réalisation BRGM	Maîtrise d'ouvrage		
Objectif(s) de l'étude				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 38		Département 61	Commune(s) Sées	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Rapport de stage de DEA Environnement-Sociétés - De l'évaluation à la maîtrise des risques de transferts de polluants agricoles vers la ressource en eau de la plaine d'Alençon : l'exemple du secteur de Sées				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/01/2002	Conseil Général de l'Orne et Syndicat Départemental de l'Eau de l'	Conseil Général de l'Orne		
Objectif(s) de l'étude				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Identifiant de l'étude 39		Département 61	Commune(s) Sées	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Etude de vulnérabilité et d'évaluation des risques de pollution - Commune de Sées - Captage de la Luzerne				
Année 01/05/1993	Réalisation GEOETHERMA	Maîtrise d'ouvrage Conseil Général de l'Orne		
Objectif(s) de l'étude Evaluer la vulnérabilité du captage et les risques de pollution associés				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère Calcaire du Bathonien sous couverture des sables et argiles du Callovien				
Caractéristiques du ou des captage(s) Forage exploité à un débit de 50 m3/h. Débit journalier de 350 à 750 m3/h. 2 arrivées d'eau principales, de teneur en nitrates de 10 et 40 mg/l				
Méthode de délimitation du BAC non délimité				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique Carte piézométrique au 1/25000 dressée par le bureau d'études à partir des mesures de terrain.				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) débit spécifique du captage				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité Il existe une carte du risque de contamination de l'aquifère. Pour la vulnérabilité, ce sont principalement la géologie (existence d'une couche imperméable) et la pédologie qui ont été pris en compte.				
Etude des sols Carte des sols au 1/100000 réalisée par la DDAF en 1982. Elle est présentée comme sujette à caution.				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles Les points de rejet des parcelles drainées sont localisés.				
Sources de pollution Recensement des sources potentielles: assainissement, activités industrielles, élevage, carrières, routes, puits abandonnés et projets d'aménagements.				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 40		Département 14	Commune(s) Bavent	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Etude géophysique à Roncheville - Prospection électromagnétique et bilan hydrogéologique				
Année 01/01/1993	Réalisation TECHSOL	Maîtrise d'ouvrage Conseil Général du Calvados		
Objectif(s) de l'étude Réalisation d'une prospection géophysique afin d'élaborer une méthodologie appropriée à l'étude des phénomènes d'invasion saline en bordure littorale				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère Jurassique (Callovien et Bathonien)				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC pas de délimitation				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique Etude géophysique par sondages et panneaux électriques. Analyses des chlorures et mesures de la conductivité dans 15 ouvrages				
Carte piézométrique non				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution non				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 41		Département 14	Commune(s) Ouistreham	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Etude hydrogéologique de synthèse - Rive gauche de l'Orne - Région de Ouistreham				
Année 01/01/1983	Réalisation Compagnie de Prospection Géophysique Française		Maîtrise d'ouvrage Conseil Général du Calvados	
Objectif(s) de l'étude Expliquer le phénomène d'invasion saline dans la zone des forages et dégager de nouvelles ressources en eau potable pour satisfaire à moyen terme les besoins de la commune de Ouistreham				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
Type d'aquifère Calcaires du Bathonien				
Caractéristiques du ou des captage(s) 3 forages exploités pour Ouistreham: 2 à 50 m3/h et 1 à 100 m3/h				
Méthode de délimitation du BAC pas de délimitation				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique Evolution des teneurs en nitrates et en chlorures, étude du mécanisme de la salure et recherche de sites d'implantation de nouveaux forages (géophysique)				
Carte piézométrique Une carte est établie à partir de "données anciennes"				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) non				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité non				
Etude des sols non				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution non				
Diagnostic parcellaire non				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 42		Département 14	Commune(s) 81 communes concernées	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Etudes préalables à la définition de programme de restauration et de préservation de la qualité des ressources en eau exploitées dans la région de Caen - Lots 1, 2 et 3 - Phase 1				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
21/12/2006	SOGETI	Syndicat Mixte de Production d'eau potable de la région de Caen		
Objectif(s) de l'étude Qualifier la sensibilité potentielle relative des secteurs d'étude vis-à-vis du risque de contamination diffuse par les phytosanitaires et les nitrates. Définir des zones où des efforts de surveillance de la qualité des eaux et de diagnostic sont à faire				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		Conseil Général du Calvados		
Type d'aquifère Calcaires du Bajocien et du Bathonien et sables du Trias				
Caractéristiques du ou des captage(s) 70 captages environ dont une trentaine capte le Trias				
Méthode de délimitation du BAC Découpage en bassins versants souterrains en se basant sur les isopièzes de la carte hydrogéologique du Calvados (Echelle: 1/100000) et sur des compléments effectués par le BE				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique Contexte hydrogéologique et description des principaux aquifères sur une zone de 300 km ²				
Carte piézométrique Carte hydrogéologique du Calvados de 1991 (Echelle 1/100000, pas entre deux isopièzes: au mieux 10 m)				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité Les éléments pris en compte sont la réserve utile (RU) des sols, l'occupation des sols et la climatologie (la profondeur des captages et celle de la cimentation ne donnent rien). Il n'y a pas de carte conclusive de la vulnérabilité mais une carte "des zones prioritaires", basée sur: les zones en terre labourable ou en maraîchage et à RU < 100mm + les mêmes zones situées en Périmètre de Protection Rapproché des captages				
Etude des sols Carte des valeurs de réserve utile des sols. Le calcul de la RFU à partir de la RU n'est pas indiqué.				
Etude de la ZNS non				
Pratiques agricoles non				
Sources de pollution Identification des pressions phytosanitaires agricoles et non agricoles et des pressions nitrates. Pas de spatialisation sauf des CIPAN.				
Diagnostic parcellaire Carte de l'occupation des sols dressée à partir du RGA de 2000				
Plan d'actions non				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 43		Département 51	Commune(s) Saint-Remy-sur-Bussy	Direction de secteur DVM
Intitulé de l'étude Captage d'Alimentation en Eau Potable de Saint-Remy-sur-Bussy (Marne) - Etude du bassin d'alimentation				
Année 01/03/2002	Réalisation ANTEA	Maîtrise d'ouvrage District de Suippes		
Objectif(s) de l'étude Le rapport est établi dans le cadre d'une étude pilote portant sur trois sites. Les objectifs sont d'évaluer les prescriptions proposées dans les PP, de comprendre les phénomènes de pollution diffuse et de proposer des modalités d'action.				
Temps passé	Coûts 15365,34 euros HT	Partenaires AESN		
Type d'aquifère Craie sénonienne				
Caractéristiques du ou des captage(s) HA mentionne un débit de 60 m3/h. Exploitation à hauteur de 20000 m3/an.				
Méthode de délimitation du BAC Basée sur la carte piézométrique. Estimation des surfaces de la zone influencée, de la zone d'appel et des isochrones à 50, 100 et 200j				
Surface du BAC 300 ha				
Etude hydrogéologique Réalisation de deux sondages, définition du sens d'écoulement, évaluation du gradient, battement				
Carte piézométrique Carte piézométrique de l'ERH (1966) et mesures terrain permettent de dessiner une carte piézo au voisinage du captage.				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) T de 2,2.10-3 m ² /s. S évalué à 1%				
Modèle maillé non				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité Dressée sur le BAC à partir de la ZNS, de la pédologie et de l'environnement humain (notes les plus mauvaises sur l'autoroute, la RD et un poulailler). La géologie n'est pas discriminante: craie sans recouvrement imperméable.				
Etude des sols Carte pédologique				
Etude de la ZNS Profils de nitrates, Na, K, SO4, Cl et pesticides sur les deux sondages (prof. maxi = ZNS: 5,5 m)				
Pratiques agricoles Oui, doses d'engrais et de pesticides. Utilisation de CIPAN. Liste des produits utilisés.				
Sources de pollution Inventaire des sources de pollutions agricoles, industrielles (aucune) et urbaine dans le PPE. Autoroute à l'extérieur du PPE mais dans le BAC				
Diagnostic parcellaire Carte d'occupation des sols dans le PPE par recensement en mars 2001.				
Plan d'actions propositions d'actions avec précision du cadre législatif. Quelques montants d'aide sont indiqués.				
Indicateurs non				

Identifiant de l'étude 44		Département 77	Commune(s) Provins	Direction de secteur DRIF
Intitulé de l'étude Etude des bassins d'alimentation des captages de la région de Provins gérés par EAUDEPARIS				
Année	Réalisation	Maîtrise d'ouvrage		
01/05/2006	EAUDEPARIS (SAGEP)	EAUDEPARIS		
Objectif(s) de l'étude Synthèse des connaissances hydrogéologiques, pédologiques et environnementales accumulées sur les sources captées de la Voulzie, du Durteint et du Dragon. Présentation des actions en cours pour reconquérir la qualité de l'eau.				
Temps passé	Coûts	Partenaires		
		AESN		
Type d'aquifère Calcaires karstiques de Champigny et calcaires Lutétiens				
Caractéristiques du ou des captage(s) Captage de 3 sources pour Paris. Plusieurs forages et galeries sur chaque site. Au total, production de 100000m3/j				
Méthode de délimitation du BAC Basée sur la carte piézométrique et les traçages. Bonne concordance avec la topographie. Evaluation de l'infiltration à partir des surfaces de BAC, des débits (sur 30 ans) et de la pluviométrie interannuels				
Surface du BAC 23 km ² (sources du Dragon) / 85 km ² (sources du Durteint) / 86 km ² (sources de la Voulzie). Total 194 km ² ; extension possible jusqu'à 242 km ²				
Etude hydrogéologique Qualité des eaux aux sources. Description climatique et hydrologique. Sens d'écoulement et puissance de la nappe. Datation des eaux.				
Carte piézométrique Carte de C. Mégrien.				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?) T de 0,1 à 10 ⁻⁴ m ² /s et S de 2,5 à 8,5%				
Modèle maillé non cité				
Traçages De 1908 à 1910 puis de juin 2000 à juin 2001. Plusieurs traçages positifs. Vitesses de transferts estimées. Maxi: 500m/h				
Carte de vulnérabilité Carte de vulnérabilité d'un cours d'eau (perméable ou non). Les gouffres/carrières sont notés. 3 classes de vulnérabilité basées sur la géologie à l'affleurement (une carte par groupe de sources)				
Etude des sols Carte des terres agricoles, basée sur la nature des sols				
Etude de la ZNS non citée				
Pratiques agricoles Non détaillées				
Sources de pollution Recensement des activités potentiellement polluantes: agricoles, industrielles, assainissement, voies de communication				
Diagnostic parcellaire Non cartographié dans le rapport. Données statistiques				
Plan d'actions Description de quatre actions "cadre" et retour sur ce qui a déjà été réalisé pour chacune d'elle				
Indicateurs oui				

Identifiant de l'étude 45		Département 50	Commune(s) Sainteny	Direction de secteur DBN
Intitulé de l'étude Etude phytosanitaire du SYMPEC				
Année 22/02/2007	Réalisation PLANIS	Maîtrise d'ouvrage SYMPEC		
Objectif(s) de l'étude				
Temps passé	Coûts	Partenaires AESN		
Type d'aquifère sables du Pliocène				
Caractéristiques du ou des captage(s)				
Méthode de délimitation du BAC				
Surface du BAC				
Etude hydrogéologique				
Carte piézométrique oui, issue d'un modèle SOGREAH. Carte de captivité				
Paramètres hydrogéologiques (K, e, i, coef emm, Q ?)				
Modèle maillé				
Traçages non				
Carte de vulnérabilité				
Etude des sols				
Etude de la ZNS				
Pratiques agricoles				
Sources de pollution				
Diagnostic parcellaire				
Plan d'actions				
Indicateurs				

Annexe 7

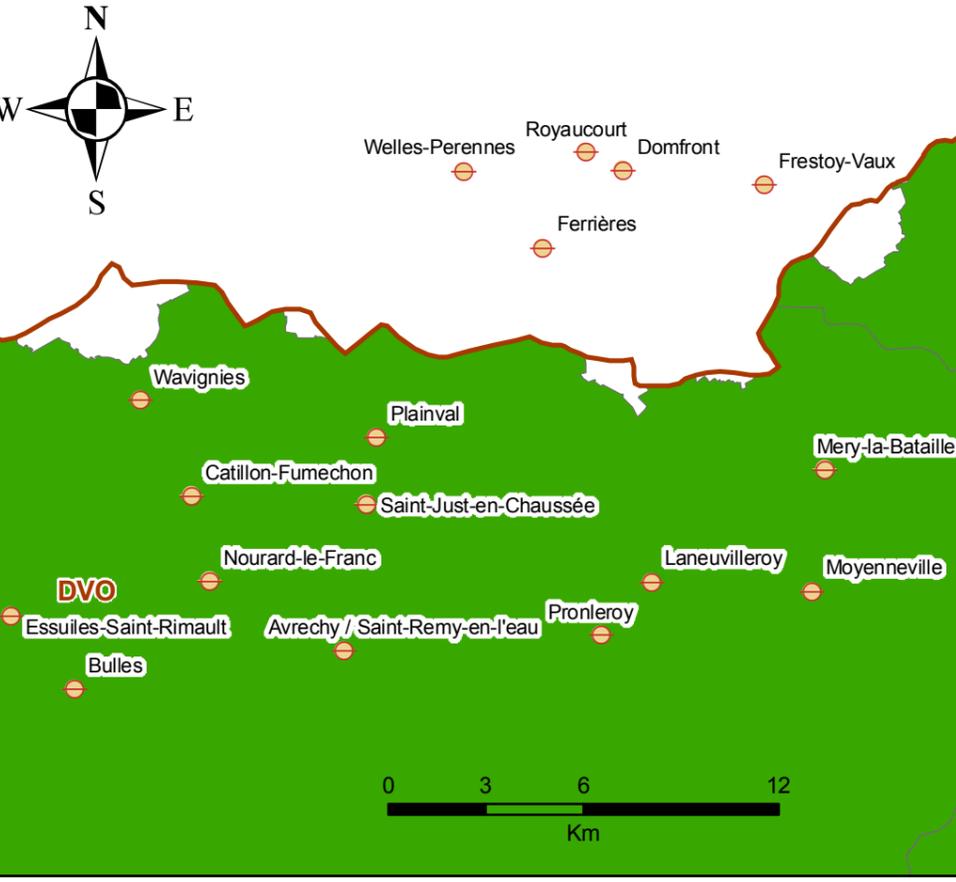
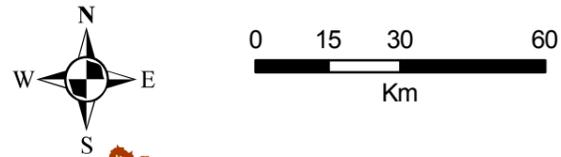
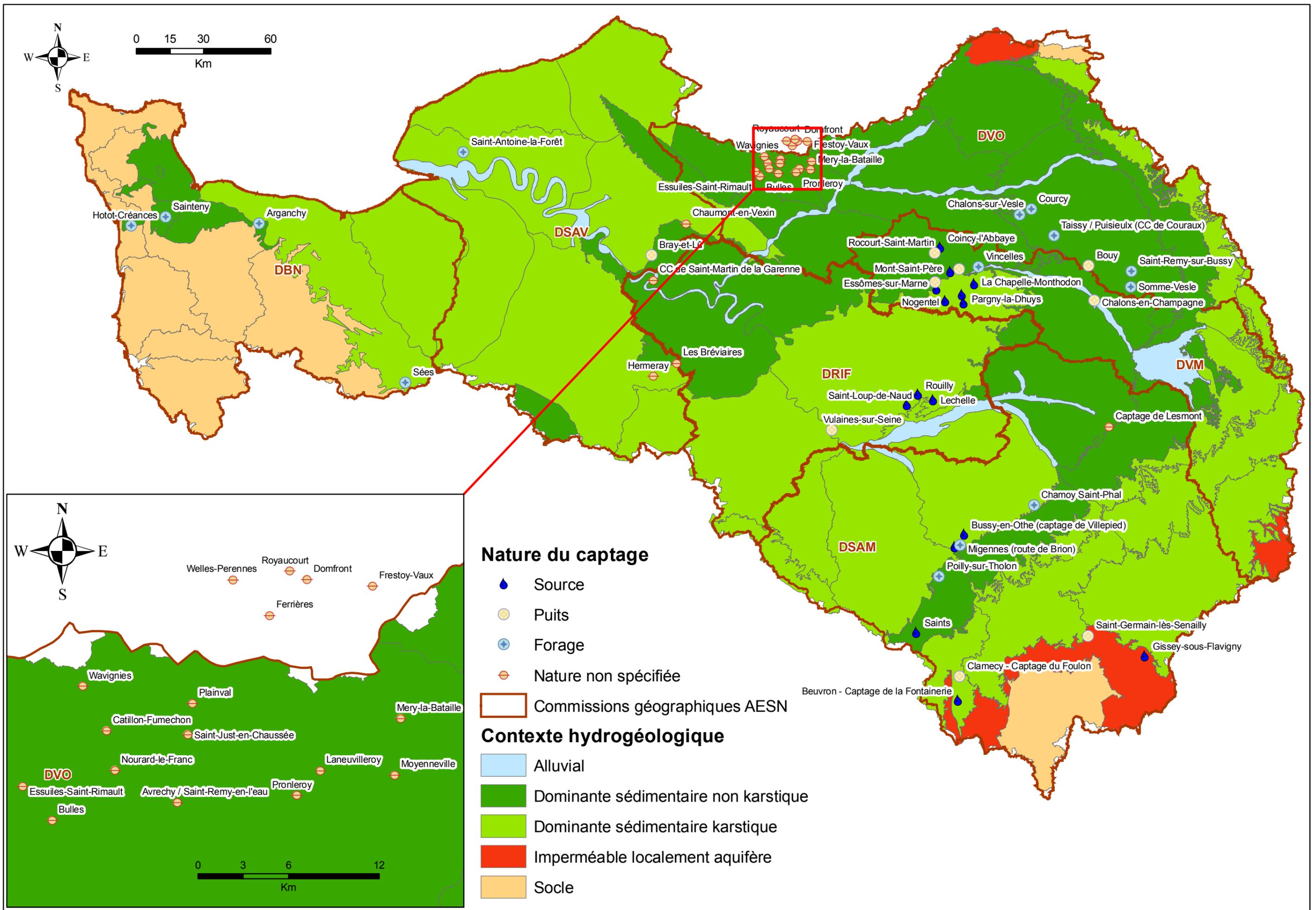
Méthodes de détermination des BAC et de la vulnérabilité utilisées dans les rapports transmis par l'Agence de l'Eau

COMMUNE	DPT	SECTEUR	INDICE BSS	Nature du captage	Masse d'eau	Méthode BAC	Méthode vulnérabilité	Type d'aquifère	Surface du BAC
Arganchy	14	DBN	01184X0051	forage	3402	LT		Trias gravelo-sableux. Nappe captive	de l'ordre de 4 km² environ (il s'agit d'un bassin topographique)
Hotot-Créances	50	DBN	01168X0005	forage	3101	LT	S	Pliocène, nappe libre	1.68 km² (zone proche) et 4.74 km² (zone éloignée). Aire définie en 1985: 250 ha
Sainteny	50	DBN	02136X0001, 02136X0004 et 02137X0011	forage	3101		D, S, I	Sables du Pliocène	
Sées	61	DBN			3308			Bathonien	1000 ha environ
Lechelle	77	DRIF		source	3103	CH et TR	I, K	calcaires karstifiés de Champigny et calcaires du Lutétien à la base	86 km²
Rouilly	77	DRIF		source	3103	CH et TR	I, K	calcaires karstifiés de Champigny et calcaires du Lutétien à la base	85 km²
Saint-Loup-de-Naud	77	DRIF		source	3103	CH et TR	I, K	calcaires karstifiés de Champigny et calcaires du Lutétien à la base	23 km²
Vulaines-sur-Seine	77	DRIF	02587X0013, 02587X0088 et 02587X0087	3 puits forés	3103	CG et CH	D, I	calcaires de Champigny, souvent karstifiés	5 km² (piezo 1967) et 35 km² (piezo 2004). L'étude a entièrement pris en compte les deux délimitations
?	78	DRIF	?					non précisé	
Artoire	78	DRIF	?					non précisé	
Autouillet	78	DRIF	?					non précisé	
Bazoches	78	DRIF	?					non précisé	
CC de Buchelay et Rosny-sur-Seine	78	DRIF	?						
CC de Saint-Martin de la Garenne	78	DRIF	?	forages	3107			alluvions de la Seine + craie?	
Hermeray	78	DRIF	02177X0005		3211			non précisé	
La Mauldrette et CC de Cressay	78	DRIF	?					non précisé	
Les Bréviaires	78	DRIF	02181X0026		3102			non précisé	
Saint Lambert des Bois	78	DRIF	?					non précisé	
Bray-et-Lû	95	DRIF	01257X1001	puits	3107	BH et LT	S	Craie sénonienne sous couverture alluviale (nappe en charge sous tourbe, sinon libre)	5.37 km², dont 2.28 km² de craie affleurante (paragraphe 2.5). En 4.1, la surface indiquée est de 457 ha
Captage de Lesmont	10	DSAM	02636X0011					alluvial?	rapport incomplet -> surfaces inconnues
Captage de Verricourt	10	DSAM	02635X0041	forage				craie?	rapport incomplet -> surfaces inconnues
Chamoy Saint-Phal	10	DSAM	03335X0029	forage	3209	CH et LT	S	Craie du Cénomanién	1700 ha (zone d'appel estimée à 0.26 km²)
Gissey-sous-Flavigny	21	DSAM	04684X0008	source	3310	CG		Bajocien, domaine karstique	133.2 ha
Saint-Germain-lès-Senailly	21	DSAM	04368X0022	puits	3310	CG et CH		Bajocien, domaine karstique	194.75 ha
Beuvron - Captage de la Fontainerie	58	DSAM	04657X0007	source	4061	BH et TR et CG et LT	D, A, S, I, K	Calcaires karstiques du Jurassique	le bv topographique fait 0.77 km² ce qui est bien trop faible par rapport au débit. Aire estimée de 7 km²
Clamecy - Captage du Foulon	58	DSAM	04653X0004	puits	4061	CG et LT	D, A, S, I, K	Calcaires karstiques du Jurassique sous alluvions. Semi-captif	environ 25 km² dont 7.5 km de cours d'eau
Bussy-en-Othe (captage de Villepied)	89	DSAM	03674X0001	source	3209	CH et LT et TR et BH		Craie cénomaniénne (karst)	5 km²
Laroche Saint-Cydroine (la Fontaine au Seigneur)	89	DSAM	03673X0015	source	3209	CH et LT		Craie cénomaniénne (karst)	de l'ordre de 10 km² environ
Migennes (route de Brion)	89	DSAM	03674X0004	forage	3209	CH et LT		Craie cénomaniénne (karst)	de l'ordre de 2.5 km² environ
Poilly-sur-Tholon	89	DSAM	?	forage	3217	CH et LT et TR et CG	I, S, PC	sables albiens	210 ha
Saints	89	DSAM	04341X0004	source	4061	CG et CH	D, S, T, I, K, OS	Sédimentaire karstique (Calcaires du Jurassique)	A : 3278 ha / B : 2425 ha
Saint-Antoine-la-Forêt	76	DSAv	00756X0004, 00756X0005, 00756X0139 et 00756X0039	3 forages et 1 puits	3202	CH et TR	D, S, K	craie sénonienne	3 km² sur la base de la piézométrie, 6 à 7 km² sur la base du débit pompé et 122 km² en prenant en compte une alimentation par la rivière (tout son bv)
Coigny-l'Abbaye	2	DVM	?	source	3105	CG et LT		Calcaires du Lutétien	9 km² environ (estimé sur la carte papier!)
Courtemont-Varennes	2	DVM	01564X0006 à 0008	3 puits	3004	CH et LT		nappe alluviale de la Marne	de 3 à 5 km²

COMMUNE	DPT	SECTEUR	INDICE BSS	Nature du captage	Masse d'eau	Méthode BAC	Méthode vulnérabilité	Type d'aquifère	Surface du BAC
Essômes-sur-Marne	2	DVM	?	puits	3004	CG et LT		Alluvions de la Marne sur substratum constitué des argiles sparnaciennes	?
La Chapelle-Monthodon	2	DVM	01575X1029, 01575X1048	2 sources	3103	CH et LT		calcaires du Lutétien	entre 12 et 15 km²
Montfaucon / source de Coupigny	2	DVM	01863X0031	source	3103	CH et BH et LT		Calcaire de Champigny karstifié	294 ha
Montlevon	2	DVM	01568X0083	source	3103	CH et BH et LT		calcaires du Lutétien	114 ha
Mont-Saint-Père	2	DVM	?	source	3105	CG et LT		Sables du Cuisien	?
Nogentel	2	DVM	?	source	3103	CG et LT		Sables du Cuisien	?
Pargny-la-Dhuys	2	DVM	01864X1012, 01864X1034, 01864X1035	source	3103	CH et BH et LT		Calcaire de Champigny karstifié	Bassin versant de 6020 ha et aire d'alimentation basée sur Putile et débit des sources d'une surface de 7300 ha
Rocourt-Saint-Martin	2	DVM	?	puits	3105	CG et LT		Calcaires du Lutétien	4 km² environ (estimé sur la carte papier!)
Bouy	51	DVM	01591X0002	puits	3207	CH et LT et EA		Craie sénonienne	Bassin versant de 7.5 km². Zone d'étude (isochrones) d'environ 2.1 km²
Chalons-en-Champagne	51	DVM	01891X0013, 01891X0039 à 0043	33 puits, 3 puits à drains rayonnants et 2 forages	3004 et 3208	SN	D, S, PH	Craie sénonienne (forages) et nappe alluviale de la Marne (puits). Craie localement captive, sinon en continuité hydraulique avec les alluvions	17 communes concernées par le BAC et 13 par la zone d'appel. Le BAC couvrirait une surface de l'ordre de 200 km². A faire confirmer
Chalons-sur-Vesle	51	DVM	01314X0061	forage	3207	LT et EA		craie sénonienne. Développement d'une karstification (perte du ruisseau)	600 ha environ
Courcy	51	DVM	01321X0013	forage	3207	CH et LT	D, S, I, OS, EH	Craie sénonienne	490 ha
Saint-Remy-sur-Bussy	51	DVM	01594X0008	forage		CH	D, S, EH	craie sénonienne	300 ha
Somme-Vesle	51	DVM	01597X0014	forage	3207	CH	D, S, T, I, OS, EH	Craie sénonienne	1360 ha
Taissy / Puisieux (CC de Couraux)	51	DVM	01326X0039 à 01326X0041, 01326X0052, 01326X0056 à 01326X0062	10 forages	3207	SN	S, T, I	craie sous alluvions	non délimité dans cette phase 1 de l'étude
Vincelles	51	DVM	?	forage	3004 et 3208	SN		Craie sénonienne sous sables thanétiens sous alluvions de la Marne	100 ha environ
Avrechy / Saint-Remy-en-Ieau	60	DVO	01034X0050		3205			craie sénonienne	entre 15 et 20 km² (estimé sur la carte papier!)
Bulles	60	DVO	01032X0009		3205			craie sénonienne	environ 4 km² (estimé sur la carte papier!)
Catillon-Fumechon	60	DVO	00807X0006		3205			craie sénonienne	environ 4 km² (estimé sur la carte papier!)
Chaumont-en-Vexin	60	DVO	01261X0088		3201			craie sénonienne?	838 ha
Domfront	60	DVO	00811X0040		1012			craie sénonienne	> 10 km² (estimé sur la carte papier!)
Essuiles-Saint-Rimault	60	DVO	01032X0016		3205			craie sénonienne	de l'ordre de 20 km² (estimé sur la carte papier!)
Ferrières	60	DVO	00815X0066		1012			craie sénonienne	> 8.5 km² (estimé sur la carte papier!)
Frestoy-Vaux	60	DVO	00812X0065		1012			craie sénonienne	environ 10 km² (estimé sur la carte papier!)
Laneuville	60	DVO	01041X0029		3205			craie sénonienne	de 5 à 10 km² (estimé sur la carte papier!)
Mery-la-Bataille	60	DVO	00816X0044		3205			craie sénonienne	> 7 km² (estimé sur la carte papier!)
Moyenneville	60	DVO	01042X0002		3205			craie sénonienne	environ 20 km² (estimé sur la carte papier!)
Nourard-le-Franc	60	DVO	?		3205			craie sénonienne	environ 4 km² (estimé sur la carte papier!)
Plainval	60	DVO	00808X0056		3205			craie sénonienne	> 6 km² (estimé sur la carte papier!)
Pronleroy	60	DVO	01041X0031		3205			craie sénonienne	de 5 à 10 km² (estimé sur la carte papier!)
Royaucourt	60	DVO	00811X0021		1012			craie sénonienne	environ 6 km² (estimé sur la carte papier!)
Saint-Just-en-Chaussée	60	DVO	00808X0047		3205			craie sénonienne	
Wavignies	60	DVO	00807X0046		3205			craie sénonienne	environ 4 km² (estimé sur la carte papier!)
Welles-Perennes	60	DVO	00804X0045		1012			craie sénonienne	> 5 km² (estimé sur la carte papier!)

Annexe 8

Cartes de localisation des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie



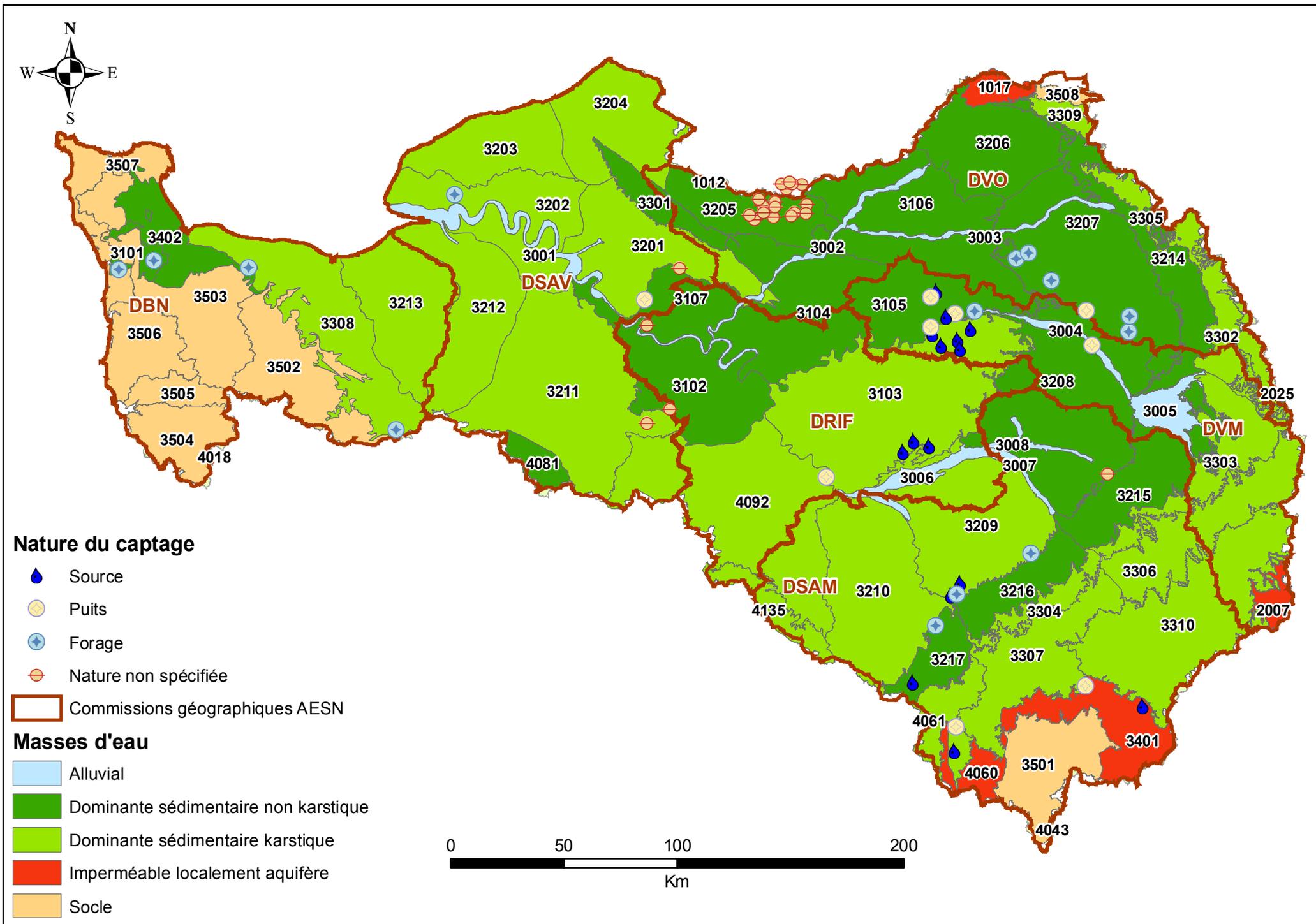
Nature du captage

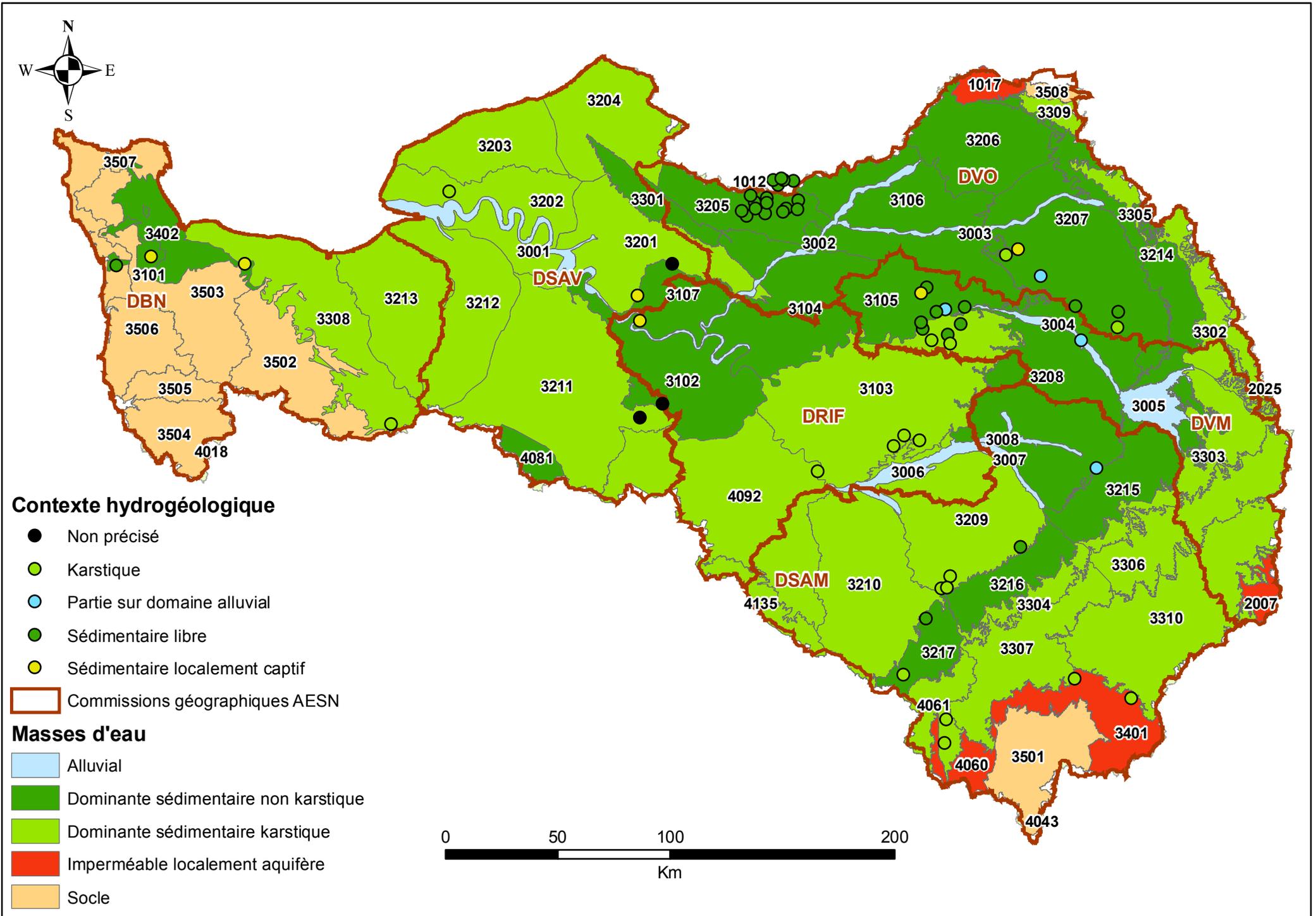
-  Source
-  Puits
-  Forage
-  Nature non spécifiée

 Commissions géographiques AESN

Contexte hydrogéologique

-  Alluvial
-  Dominante sédimentaire non karstique
-  Dominante sédimentaire karstique
-  Imperméable localement aquifère
-  Socle







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