

Partenariat 2013 – *pollutions diffuses* – Action 23



Délimitation des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine et de leur vulnérabilité vis- à-vis des pollutions diffuses

*Version révisée du guide
méthodologique*

Rapport final

J.F. Vernoux, A. Wuilleumier, J. Perrin (BRGM)

Février 2014

Document public

Délimitation des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses

Version révisée du guide méthodologique

Rapport final

BRGM/RP-63311-FR

Février 2014

Étude réalisée dans le cadre de la convention ONEMA-BRGM
2013-2015

J.F. Vernoux, A. Wuilleumier, J. Perrin

Vérificateur :

Nom : A. Gutierrez

Date : 30/07/2014

Signature :

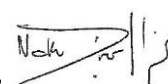


Approbateur :

Nom : N. Dörfliger

Date : 21/10/2014

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : aire d'alimentation de captage, AAC, carte de vulnérabilité, pollution diffuse, guide méthodologique, eau souterraine, vulnérabilité intrinsèque, vulnérabilité spécifique

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

Vernoux J.F., Wuilleumier A. Perrin J. (1024) – Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Version révisée du guide méthodologique, rapport BRGM/RP-63311-FR, 133 p., 69 illustrations, 1 annexe.

Convention ONEMA-BRGM

Les auteurs

J.F. Vernoux
Hydrogéologue mission
jf.vernoux@brgm.fr

A. Wuilleumier
Hydrogéologue
a.wuilleumier@brgm.fr

J. Perrin
Hydrogéologue
Je.perrin@brgm.fr

Les correspondants

Onema : C. Billy (chargée de mission onema)

Partenaire : L. Gourcy (chef de projet brgm)

Droits d'usage :	<i>accès libre</i>
Couverture géographique :	France
Niveau géographique [un seul choix] :	national
Niveau de lecture [plusieurs choix possibles] :	professionnels, experts
Nature de la ressource [plusieurs choix possibles] :	document

Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Version révisée du guide méthodologique
Vernoux J.F., Wuilleumier A., Perrin J.

RESUME

Résumé

En réponse aux exigences issues de la directive cadre sur l'eau, la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30/12/2006 a renforcé les dispositifs de maîtrise des pollutions diffuses d'origine agricole par la création des zones de protection des aires d'alimentation de captages. La mise en œuvre de ce nouveau dispositif de protection de la ressource impose de disposer d'une méthodologie commune à l'échelle nationale.

Pour opérer la protection de ces captages vis-à-vis des pollutions diffuses, il convient de définir et de mettre en œuvre des programmes d'action adaptés. La démarche d'élaboration du plan d'action prévoit plusieurs étapes successives et complémentaires qui incluent un certain nombre d'études préalables visant à :

- identifier les contours de l'Aire d'Alimentation du Captage (AAC)
- cartographier la vulnérabilité propre au milieu, en fonction des modes de transferts identifiés et indépendamment des pressions exercées ;
- identifier les pressions exercées par les activités potentiellement polluantes sur le territoire et analyser le contexte socio-économique dans lequel elles interviennent.

Une étude financée par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, la Direction de l'Eau et de la Biodiversité et le BRGM avait conduit à élaborer en 2007 une méthodologie de délimitation des aires d'alimentation de captages et de leur vulnérabilité intrinsèque vis-à-vis des pollutions diffuses. Suite aux nombreuses études d'AAC réalisées ces dernières années, ce guide méritait d'être révisé dans la mesure où il existe encore plusieurs milliers de captages considérés comme prioritaires vis-à-vis de la lutte contre les pollutions diffuses et pour lesquels des études AAC et des plans d'actions doivent être mise en œuvre. L'objectif est également de valoriser les études réalisées ces dernières années pour améliorer le guide actuel.

Par rapport à la version initiale, les modifications portent essentiellement sur les points suivants :

- Clarification des concepts
- Utilisation de la méthode PaPRIKa pour les AAC en milieu karstique
- Retour d'expérience d'études réalisées par des BE en utilisant la méthodologie BRGM ; analyse des problèmes rencontrés
- Mise au point d'une méthodologie adaptée aux contextes volcaniques dans les DOM
- Méthode de cartographie de vulnérabilité spécifique pour les pesticides
- Adaptation de la méthodologie pour une meilleure prise en compte des relations entre eau souterraine et eau de surface
- Utilisation des outils de modélisation pour une meilleure délimitation des AAC et des zones contributives

Mots clés (thématique et géographique)

Aire d'alimentation de captage, carte de vulnérabilité, pollution diffuse, guide méthodologique, eau souterraine, vulnérabilité intrinsèque, vulnérabilité spécifique

Catchment area delineation and vulnerability mapping for wellhead protection against diffuse pollution. Revised version of methodological guide

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Perrin J.

ABSTRACTS

ABSTRACT

In response to the requirements of Water Framework Directive, the law on water and aquatic environments reinforced the means of pollution control by creating wellhead protection areas. The implementation of this new plan requires a common methodology at national scale.

To operate wellhead protection against diffuse pollution, adapted protective actions must be defined and taken. The approach for the development of action plan provides several additional steps which include several preliminary studies aiming to :

- identify the limit of Catchment zone
- map the intrinsic vulnerability, according to identified transfer processes and independently of effective pressures
- identify the pressures occurred by potentially polluting activities and analyse the socio-economic context in which they operate

A study financed by Seine-Normandie water agency, Water and biodiversity department in the Ecology ministry and BRGM, led to propose a methodology for catchment zone delineation and vulnerability mapping for wellhead protection against diffuse pollution. Following many studies of catchment areas during the last years, this guide should be revised in that there are always many thousands of wellheads are considered as key priorities for the fight against diffuse pollution and for which action plans must be undertaken. The objective is also to value the studies carried out during these last years in order to enhance the existing guide.

The changes made to the initial version concern essentially :

- clarification of concepts
- Use of PaPRIKa vulnerability mapping method in karstic water catchments
- Feedback of studies done by consulting firms by using BRGM methodology ; analysis of the difficulties encountered
- development of a methodology adapted to volcanic environment in overseas departments
- method of vulnerability mapping specific for pesticides
- adaptation of the methodology to better taking account the relations between groundwater and surface water
- use of modeling tools for a better delineation and catchment areas and contributive areas.

Key words (thematic and geographical area)

Wellhead catchment area, vulnerability mapping, diffuse pollution, methodological guide, groundwater, intrinsic vulnerability, specific vulnerability

Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Version révisée du guide méthodologique

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Perrin J.

SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

La démarche de protection des captages vis-à-vis des pollutions diffuses comprend plusieurs phases successives et complémentaires qui incluent un certain nombre d'études préalables visant à :

- caractériser l'état initial de la ressource (nature de la contamination) ;
- identifier les contours de l'Aire d'Alimentation du Captage (AAC)¹ et déterminer les types de transfert mis en jeu dans la contamination des eaux prélevées ;
- cartographier la vulnérabilité propre au milieu, en fonction des modes de transferts identifiés et indépendamment des pressions exercées (on parle alors de vulnérabilité intrinsèque) ;
- identifier les pressions exercées par les activités potentiellement polluantes sur le territoire et analyser le contexte socio-économique dans lequel elles interviennent.

Ces éléments de diagnostic sont ensuite confrontés pour localiser les zones les plus pertinentes pour la mise en œuvre d'un programme d'action efficace et durable au regard des enjeux de protection de la ressource comme au regard des enjeux socio-économiques. Cette dernière étape doit également s'accompagner de mesures de suivi à court et moyen termes pour évaluer l'efficacité du programme d'action engagé et, si besoin, faire évoluer celui-ci.

Un certain nombre d'outils méthodologiques a été développé pour répondre aux besoins d'ordres technique et décisionnel relatifs aux différents aspects de la démarche de protection des captages évoquée précédemment. Parmi ces outils, ceux relatifs à la délimitation et au diagnostic de vulnérabilité de l'AAC ont fait l'objet de nombreuses investigations. Ainsi, un guide dédié à l'identification des contours de l'Aire d'Alimentation et la cartographie de la vulnérabilité propre au « milieu physique » (également dénommée vulnérabilité intrinsèque) a été proposé dès 2007 pour les captages d'eaux souterraines faisant essentiellement intervenir des transferts par infiltration. Depuis cette date, de nombreuses études d'AAC ont été réalisées et un premier retour d'expérience a été possible. Par ailleurs, certains aspects peu ou pas pris en compte ont fait l'objet d'études spécifiques : le cas des aires d'alimentation de captages d'eau de surface, le cas des aires d'alimentation de captages d'eau à transferts mixtes, les AAC en contexte volcanique, une nouvelle méthode de cartographie de la vulnérabilité en milieu karstique. La méthodologie proposée en 2007 a ainsi été adaptée aux connaissances acquises depuis et confrontée à sa mise en œuvre dans les études d'AAC.

L'AAC désigne l'ensemble des surfaces contribuant à l'alimentation du captage ou, autrement dit, l'ensemble des surfaces où toute goutte d'eau tombée au sol est susceptible de parvenir jusqu'au captage, quel que soit le mode de transfert mis en jeu. En vertu de cette définition, l'AAC doit à minima inclure les différents niveaux de périmètres de protection, principalement prévus pour prévenir les pollutions d'origine ponctuelle ou accidentelle dans le voisinage plus ou moins immédiat du captage.

La délimitation précise d'une Aire d'Alimentation de Captage (AAC) constitue un premier jalon indispensable de la démarche de protection en permettant de bien cibler le territoire sur lequel porter les actions et favoriser la sensibilisation des acteurs, en particulier les agriculteurs lorsque l'AAC comporte une part non négligeable de Surface Agricole Utile (SAU). Il s'agit alors de mener des études à caractère hydrologique et hydrogéologique pour caractériser, dans toute leur complexité, les chemins de l'eau intervenant sur l'AAC.

Pour les captages d'eau souterraine, l'étude du contexte géologique et hydrogéologique de l'aquifère dans lequel se font les prélèvements est déterminante. Les données recueillies doivent à la fois permettre de définir le(s) type(s) d'aquifère contribuant à alimenter le captage, servir de base à la délimitation de l'AAC puis à la caractérisation de la vulnérabilité.

L'identification des différents types d'aquifère constitue une première étape fondamentale pour déterminer quels outils doivent être appliqués pour la délimitation de l'AAC (et par la suite la cartographie de vulnérabilité). Il est ainsi proposé de distinguer les aquifères continus, discontinus fissurés et discontinus karstiques en fonction de propriétés qui leur sont propres (comportement hydrodynamique, nature de la roche aquifère, géomorphologie...). Néanmoins, cette distinction n'est pas toujours évidente : un aquifère fissuré suffisamment homogène pourra par exemple être assimilé à un milieu continu. On peut également avoir le cas où un secteur de l'AAC correspond à un type d'aquifère et un autre secteur à un autre type ; dans ce cas on utilisera des approches différentes pour chacun des secteurs.

La vulnérabilité intrinsèque dépend des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités anthropiques. Dans la méthode proposée par le BRGM, la vulnérabilité intrinsèque est calculée à partir de la somme pondérée de plusieurs paramètres classifiés et conduit à une carte unique de vulnérabilité intrinsèque aux transferts souterrains, pour un type d'aquifère donné. Même s'il n'est toujours évident de définir le type d'aquifère, cette distinction est fondamentale car les méthodes de cartographie de vulnérabilité sont très différentes et peuvent aboutir à des résultats totalement erronés si elles ne sont pas appliquées correctement. En particulier la méthode proposée pour les aquifères discontinus fissurés s'applique à des formations fortement hétérogènes, en présence de circulations fissurales très rapides (d'une centaine de mètres ou plus par jour) et d'un ruissellement important sur le reste du système. Appliquer cette méthode pour des formations calcaires ou crayeuses certes fracturées, mais avec une capacité d'infiltration sur une grande partie de l'impluvium aboutirait à une carte erronée ; il sera préférable dans ce cas d'utiliser l'approche proposée pour les aquifères continus.

Les facteurs de pondération sont estimés selon l'importance que l'on attache aux différents paramètres ; ils varient entre 0 et 1, la somme des facteurs étant égale à 1. Des valeurs de facteurs de pondération sont proposées par défaut pour chaque type d'aquifère. Pour un aquifère continu par exemple, nous considérons que l'infiltration et les caractéristiques du sol sont les paramètres les plus importants à prendre en compte pour caractériser la vulnérabilité. Dans le cas d'un aquifère fissuré, c'est la présence de fractures (paramètre discontinuités) qui est prépondérant. Enfin dans le cas d'un aquifère karstique, c'est l'infiltration par les zones de dolines et de pertes en rivière. Ces valeurs ont bien entendu un caractère relatif et peuvent être adaptées au contexte local, en fonction de l'expertise mobilisable sur la zone.

Pour les **aquifères continus**, la délimitation de l'AAC passe tout d'abord par la délimitation de la portion de nappe alimentant le captage (PNAC). On peut définir plusieurs types de limite :

- lithologique : changement de faciès avec passage à une formation peu perméable ;
- structurale : présence d'une faille isolant le compartiment aquifère
- hydrodynamique : zone d'appel du captage, crête piézométrique.

D'une manière générale, l'utilisation d'un modèle hydrodynamique maillé est le meilleur moyen de délimiter le plus précisément possible l'AAC par rapport à des approches plus simples qui auront tendance à surestimer la surface de l'AAC (en se basant uniquement sur une carte piézométrique par exemple) ou à la sous-estimer (en se basant uniquement sur un bilan hydrologique ou sur le calcul d'une zone d'appel avec une formule analytique par exemple). Un modèle peut également permettre de déterminer les zones les plus contributives à l'alimentation du captage (sur lesquelles privilégier les actions par exemple). Cette approche est particulièrement utile pour les grandes AAC (plusieurs centaines de km²) dans des aquifères sédimentaires pour lesquelles la cartographie de vulnérabilité seule risque de conduire à des zones trop étendues pour le plan d'action.

Pour la cartographie de vulnérabilité d'une AAC d'un aquifère continu, les paramètres pris en compte sont :

- la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol (S),

- la capacité d'infiltration de l'eau dans la zone non-saturée (ZNS),
- l'épaisseur de la ZNS (H),
- la pluie efficace (P)
- la perméabilité de l'aquifère (K).

La formule de calcul proposée est la suivante : $V = 0.1 P + 0.25 I_{\text{SOL}} + 0.3 I_{\text{ZNS}} + 0.2 H + 0.15 K$

La capacité d'infiltration de l'eau dans le sol est évaluée en croisant la pierrosité, la texture et l'épaisseur totale des horizons de sol. La capacité d'infiltration de l'eau dans la zone non-saturée étant un paramètre difficile à évaluer, le BRGM propose d'utiliser l'IDPR², qui permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité intrinsèque des formations géologiques présentes en surface ou sub-surface à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie. Cet indice est constitué par comparaison du réseau hydrographique existant avec un réseau de thalwegs reconstitué à partir des pentes. L'IDPR peut être utilisé pour la plupart des aquifères continus à l'exception des aquifères alluviaux qui présentent un IDPR élevé systématiquement associé à un milieu ruisselant, ce qui ne correspond pas à la réalité. Pour ce type d'aquifère, il faut donner un poids plus important à l'épaisseur de la ZNS et le cas échéant proposer un paramètre ZNS basé sur les caractéristiques géologiques des alluvions (fines / grossières, avec ou sans particules argileuses, ...).

Les poids les plus forts sont attachés aux critères d'infiltration dans le sol et la ZNS (55 % au total) ; c'est la capacité du milieu naturel à empêcher le polluant d'atteindre la nappe. La valeur finale de vulnérabilité varie donc entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale). En l'absence d'éléments permettant de cartographier un paramètre, un poids nul lui sera affecté et les autres poids seront recalculés au prorata de leur importance dans le calcul de la vulnérabilité.

Pour les **aquifères discontinus fissurés**, la délimitation de l'AAC est réalisée à partir de la topographie (bassin versant hydrologique de la source) de la structure géologique (coupes transverses), de la présence d'autres résurgences et de la mise en évidence de connexions hydrauliques par essais de traçage artificiels.

Pour la cartographie de vulnérabilité d'une AAC d'un aquifère discontinu fissuré, nous proposons d'utiliser la méthode DISCO³, qui prend en compte trois paramètres :

- les discontinuités D (par exemple zone fracturée fortement perméable en connexion rapide avec le captage),
- la couverture protectrice P (sol et formations superficielles surmontant l'aquifère),
- le ruissellement R (d'eau en surface avant son infiltration).

La première étape consiste à évaluer les paramètres « discontinuités » D (note entre 0 et 3) et « couverture protectrice » P (note entre 0 et 4) puis à calculer le facteur de protection intermédiaire $F_{\text{int}} = 2 \cdot D + P$ (note entre 0 et 10). Un facteur de protection final F est calculé en prenant en compte le paramètre « ruissellement » en amont des surfaces caractérisées par un F_{int} faible, ce qui nécessite de délimiter les bassins versants de surface alimentant par ruissellement les zones les plus vulnérables à l'infiltration. Dans ces bassins versants, F (inverse de la vulnérabilité) est égal à la valeur F_{int} des surfaces vulnérables qu'il alimente. En dehors de ces zones, $F = F_{\text{int}}$.

Pour les **aquifères discontinus karstiques**, la délimitation de l'AAC doit s'appuyer sur la caractérisation du 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, et s'il s'agit comme c'est souvent le cas d'une source karstique, un suivi hydrologique de la source sur un ou plusieurs cycles hydrologiques et une analyse des débits selon la méthode statistique des débits classés ; La délimitation d'une AAC en milieu karstique est effectuée :

- à partir de la prise en considération de la structure géologique et de la mise en œuvre d'essais de traçages artificiels pour prouver l'existence de connexions hydrauliques pour différentes conditions hydrologiques ;

² L'IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) est disponible sur l'ensemble de la France <http://infoterre.brgm.fr/spip.php?article43>

³ L'acronyme DISCO signifie « DIScontinuités – Coouverture protectrice »

- (ii) à partir de la délimitation du bassin versant des éventuels écoulements de surface alimentant les pertes.

Pour la cartographie de vulnérabilité d'une AAC d'un aquifère discontinu karstique, la méthode proposée initialement était la méthode RISKE ; une nouvelle méthode, PaPRIKa⁴, a été développée récemment et s'avère mieux adaptée, en particulier pour la prise en compte des bassins de versants alimentant les pertes. Le choix des critères est en adéquation avec la spécificité en termes de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques. Les critères sont au nombre de 4, à savoir :

- le critère P pour couverture protectrice résultant de la combinaison la plus protectrice entre les critères S Sol s.l., la lithologie, l'épaisseur et la fracturation de la zone non saturée et le critère E pour fonctionnement épikarstique,
- le critère R pour la nature de la roche du réservoir souterrain,
- le critère I pour la nature de l'infiltration (diffuse ou ponctuelle au niveau de phénomènes exokarstiques)
- le critère Ka pour le degré de karstification et le fonctionnement du système karstique

Pour les **aquifères volcaniques**, la délimitation des AAC en est délicate compte tenu de la complexité des aquifères concernés. La méthodologie proposée est basée sur les travaux réalisés à Mayotte et à la Réunion, axés sur la caractérisation de la géométrie des aquifères. A Mayotte cette caractérisation a pu être faite par l'acquisition de données TDEM (Time Domain Electro-Magnetic) permettant de définir des corps géométriques de résistivité homogène, que l'on cherche ensuite à apparenter à des formations géologiques en se calant sur les résistivités observées à l'affleurement et en forage.

La cartographie de vulnérabilité repose sur les deux critères suivants :

- l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) qui permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité intrinsèque des formations du sous-sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie. Cette notion d'infiltration est requise dans l'élaboration de toute carte de vulnérabilité et l'IDPR peut se substituer à plusieurs critères usuellement employés ;
- l'épaisseur de la zone non saturée : dans un milieu continu ou assimilé continu, la vulnérabilité de l'aquifère diminue avec la profondeur à laquelle il se trouve.

La carte obtenue doit être interprétée non pas en tant que reflet d'une vulnérabilité absolue mais en tant que construction d'une hiérarchie des systèmes relativement à la vulnérabilité des premières nappes rencontrées.

Les approches proposées pour la cartographie de vulnérabilité ne concernent que la vulnérabilité intrinsèque. Une nouvelle approche a été développée pour évaluer la **vulnérabilité spécifique** d'une AAC vis-à-vis du transfert des produits phytosanitaires dans le sol et la zone non saturée. Elle se base sur le comportement des molécules dans l'environnement qui va essentiellement dépendre du couple DT_{50}/Koc^5 . En effet, une molécule caractérisée par un Koc faible peut avoir un potentiel de mobilité limité si elle est aussi caractérisée par une dégradation très rapide (par exemple DT_{50} = quelques heures). La combinaison de ces deux paramètres peut, dans certains cas, permettre d'estimer un risque potentiel de lixiviation. Cependant, d'autres facteurs doivent être pris en compte pour affiner la compréhension de ces risques de transfert (doses, modes de transfert dissous/particulaire, pédologie...).

⁴ L'acronyme PaPRIKa signifie « Protection des aquifères karstiques basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification ».

⁵ Le DT_{50} désigne le temps nécessaire pour que 50 % de la masse de la substance soit dégradée ; le Koc, ou coefficient d'adsorption au carbone organique des sols, caractérise la tendance d'une substance à être retenu par la matière organique des sols.

Sommaire

1	Introduction.....	19
2	Concepts et terminologie.....	21
2.1	NOTION D'AIRE D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE.....	21
2.2	NOTION DE VULNERABILITE D'UN CAPTAGE D'EAU SOUTERRAINE VIS-A-VIS DES POLLUTIONS DIFFUSES	26
3	Démarche proposée	29
4	Typologie du système aquifère.....	37
4.1	TYPES D'AQUIFERES.....	37
4.1.1	Aquifère à porosité d'interstices	37
4.1.2	Aquifère karstique	38
4.1.3	Aquifère karstique de la craie.....	40
4.1.4	Aquifère fissuré	41
4.1.5	Aquifère volcanique.....	42
4.2	CARACTERISATION DU SYSTEME	43
5	Cas d'un système aquifère continu	47
5.1	ÉTUDE ET CARACTÉRISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGÉOLOGIQUE	47
5.2	DÉLIMITATION DE L'AAC	47
5.2.1	Cas n°1 : le captage est une source	48
5.2.2	Cas n°2 : délimitation par approche analytique.....	48
5.2.3	Cas n°3 : délimitation par modélisation maillée	50
5.3	CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ	56
5.3.1	Choix de la méthode	56
5.3.2	Paramètres pris en compte	56
5.3.3	Détermination des classes de chaque paramètre	63
5.3.4	Poids des paramètres et classes de vulnérabilité	64
5.3.5	Zone contributive à l'AAC par ruissellement	65
5.3.6	Exemple d'application	65
5.4	IDENTIFICATION DE ZONES CONTRIBUTIVES	69
6	Cas d'un système aquifère discontinu karstique	73
6.1	ETUDE ET CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE	73
6.2	DELIMITATION DES AIRES D'ALIMENTATION DE CAPTAGES (AAC)	74
6.2.1	Systèmes karstiques unaires	74
6.2.2	Systèmes karstiques binaires	75
6.2.3	Calcul du bilan hydrologique	75
6.2.4	Autres méthodes.....	77
6.3	CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE	77
6.3.1	Introduction	77
6.3.2	Méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques	78
6.3.3	La méthode PaPRIKa	78
6.3.4	Paramètres pris en compte et classification.....	80
6.4	EXEMPLES DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE D'AQUIFERES KARSTIQUES 92	
6.4.1	Aquifère de la craie : système karstique de Cany-Barville (Normandie)	92
6.4.2	Système karstique binaire de l'Ouyse (département du Lot)	96
7	Autres cas de figure	101

7.1 CAS D'UN SYSTÈME AQUIFÈRE DISCONTINU FISSURÉ	101
7.1.1 Étude et caractérisation du bassin versant hydrogéologique	101
7.1.2 Délimitation de l'AAC	101
7.1.3 Cartographie de la vulnérabilité	102
7.2 CAS D'UN SYSTÈME AQUIFÈRE VOLCANIQUE	106
7.2.1 Délimitation de l'AAC	106
7.2.2 Cartographie de la vulnérabilité de l'AAC	115
8 Vulnérabilité spécifique vis-à-vis des pesticides	125
9 Conclusion	131
10 Sources de données	133
11 Boîte à outils	135
11.1 OUTILS DE CARTOGRAPHIE	135
11.2 OUTILS DE MODELISATION ET DE DELIMITATION DE LA PORTION DE NAPPE ALIMENTANT LE CAPTAGE	135
11.3 OUTILS DE CALCUL DU BILAN HYDROLOGIQUE	136
12 Bibliographie	137
13 Glossaire	143

Liste des illustrations

<i>Illustration 1- Représentation schématique d'une aire d'alimentation du captage</i>	<i>22</i>
<i>Illustration 2 – bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre</i>	<i>24</i>
<i>Illustration 3 – bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas complexe (in Bussard, 2005)</i>	<i>25</i>
<i>Illustration 4 – Exemple de bassin d'alimentation pour une nappe captive</i>	<i>26</i>
<i>Illustration 5 – Approche européenne de la cartographie de la vulnérabilité basée sur le modèle conceptuel "origine-écoulements-cible" (COST Action 620, 2004).</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 6 – Distinction entre portion de nappe alimentant le captage et zone d'influence</i>	<i>33</i>
<i>Illustration 7 - Paramètres pris en compte pour le calcul de la vulnérabilité pour trois types d'aquifères</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 8 - Représentation schématique de quatre aquifères caractérisés par une hétérogénéité croissante A) milieu poreux homogène B) milieu fissuré faiblement hétérogène C) milieu fissuré hétérogène D) milieu karstique (in Pochon & Zwahlen, 2003)</i>	<i>37</i>
<i>Illustration 9 : Classification typologique des captages en milieu karstique (modifié d'après Muet et al. 2006)</i>	<i>38</i>
<i>Illustration 10 : Les deux types de systèmes karstiques (modifié d'après AERMC 1999)</i>	<i>40</i>
<i>Illustration 11 : Coupe d'une coulée « aa » en mouvement</i>	<i>43</i>
<i>Illustration 12 – Exemple de fluctuations piézométriques (2004-2007) au fonction du type d'aquifère</i>	<i>45</i>
<i>Illustration 13 – Tableau d'aide à la caractérisation des aquifères</i>	<i>46</i>
<i>Illustration 14 – Calcul de l'extension d'une zone d'appel par approche analytique</i>	<i>49</i>
<i>Illustration 15 – Captages de Blainville-sur-Orne – trajectoires inverses simulées</i>	<i>52</i>
<i>Illustration 16 – Captage 01201X0002 de Blainville-sur-Orne – trajectoires inverses simulées</i>	<i>52</i>
<i>Illustration 17 – Captage 01201X0002 de Blainville-sur-Orne – AAC proposée</i>	<i>53</i>
<i>Illustration 18 – Captage des Bordes – trajectoires inverses simulées en nappe alluviale (les coordonnées et la piézométrie sont exprimées en mètres)</i>	<i>55</i>
<i>Illustration 19 : Extension de l'AAC* et sous-découpage en deux parties : alluviale et de coteaux</i>	<i>55</i>
<i>Illustration 20 – Coupe verticale schématique d'un cas d'alimentation par ruissellement d'une nappe alluviale sollicitée par un captage (en rouge)</i>	<i>58</i>

Illustration 21 : Tableau de détermination de la nature d'un sol en fonction de sa texture et sa proportion de cailloux.* : définition des Arénosols, ** : définition des Peyrosols.	59
Illustration 22 : Indexation du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur	60
Illustration 23 : Tableau de détermination des classes du critère S à partir uniquement des classes d'épaisseur et de la pierrosité	60
Illustration 24 - Calcul de l'indice d'un paramètre à partir de ses valeurs (milieu continu)	63
Illustration 25 - Adaptation des classes de valeurs du paramètre H dans le cas d'une carte piézométrique présentant une situation de basses eaux	63
Illustration 26 - Poids des paramètres pris en compte pour caractériser la vulnérabilité en milieu continu	64
Illustration 27 – Cartes des paramètres pris en compte pour la détermination de la vulnérabilité sur l'AAC* du champ captant de Vert-en-Drouais	67
Illustration 28 – Cartographie de la vulnérabilité de l'AAC* du champ captant de Vert-en-Drouais	68
Illustration 29 - Méthode de détermination des zones contributives associées à un captage d'eau potable (Bellier, 2013)	70
Illustration 30 - Enveloppes de contribution aux captages de la Fosse de Melun pour une période de faible recharge (a) et de forte recharge (b) (Bellier, 2013)	71
Illustration 31 : Schéma conceptuel d'un aquifère karstique avec le positionnement des différents critères utilisés pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque (Dörfliger & Plagnes 2009)	79
Illustration 32 : Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques.....	80
Illustration 33 : Indexation du sous-critère E – « aquifère épikarstique »	81
Illustration 34 : Tableau décrivant la lithologie de la zone non saturée	82
Illustration 35 : Indexation du sous-critère ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation	82
Illustration 36 : Indexation du critère P (état de surface) dans les bassins versants des pertes	83
Illustration 37 : Définition du critère R dans le cas d'un aquifère karstique de type karst « classique ».....	84
Illustration 38 : Définition du critère R au sein de la Zone saturée dans le cas d'aquifères superposés à partir de données à l'affleurement proche de la source, des données de forages-sondages, galeries et objets géotechniques de type tunnel.	84
Illustration 39 : Indexation du critère R « réservoir roche aquifère ».....	85
Illustration 40 : Indexation du critère I « conditions d'infiltration ».....	86
Illustration 41 : Décomposition de la récession du débit d'une source en deux fonctions reproduisant la décrue puis le tarissement (Marsaud 1997)	87
Illustration 42 : Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin 1975, El Hakim & Bakalowicz 2007)	89
Illustration 43 : Indexation du critère K	90
Illustration 44 : Tableau des pondérations pour les différents critères de la méthode PaPRIKa	91
Illustration 45 : Tableau des classes de vulnérabilité globale (Vg)	91
Illustration 46 : Carte du critère P du système karstique de Cany Barville (Normandie)	92
Illustration 47 : Carte du critère R roche du réservoir du système karstique de Cany Barville (Normandie).....	93
Illustration 48 : Carte du critère I du système karstique de Cany Barville (Normandie).....	93
Illustration 49 : Carte du critère Ka du système karstique de Cany Barville (Normandie)	94
Illustration 50 : Cartes de vulnérabilité du système karstique de Cany Barville (Normandie), La carte retenue est la première.....	95
Illustration 51 - Carte hydrogéologique du système karstique de l'Ouyse et délimitation de l'aire d'alimentation en rouge	97
Illustration 52 : Cartographies des différents critères pris en compte dans les parties non karstique (bassin versant des pertes) et karstique du système karstique binaire de l'Ouyse... ..	99
Illustration 53 : Carte de vulnérabilité intrinsèque du système karstique binaire de l'Ouyse ..	100
Illustration 54 – Exemple de délimitation d'une AAC en milieu discontinu à partir d'essais de traçages (Pochon et Zwahlen, 2003)	102
Illustration 55 – Méthode de cartographie multi-critères « DISCO » (Pochon et Zwahlen, 2003)	105
Illustration 56 : Modèle « Hawaïen » (Mac Donald et al, 1983).....	107

<i>Illustration 57 : Modèle « Canarien » (Folio, 2001)</i>	<i>107</i>
<i>Illustration 58 - Logigramme expliquant comment utiliser les données TDEM dans une démarche de délimitation d'AAC (Castillo et al., 2013).</i>	<i>110</i>
<i>Illustration 59 : Délimitation retenue pour l'aire d'alimentation du captage Kawéni 3 10 pouces.....</i>	<i>113</i>
<i>Illustration 60 : Localisation géographique des AAC et des captages prioritaires</i>	<i>114</i>
<i>Illustration 61 : Résultat du calcul IDPR sur l'Île de la Réunion. Les zones rouges et bleues indiquent respectivement les zones majoritairement infiltrantes et ruisselantes.....</i>	<i>116</i>
<i>Illustration 62 : Définition des unités fonctionnelles.....</i>	<i>117</i>
<i>Illustration 63 : IDPR par unités fonctionnelles homogènes.....</i>	<i>118</i>
<i>Illustration 64 : Valeurs normées du critère IDPR selon la nature de la nappe d'eau souterraine</i>	<i>119</i>
<i>Illustration 65 : Critère IDPR affecté aux unités fonctionnelles homogènes</i>	<i>120</i>
<i>Illustration 66 : Pente topographique en vert clair et surface piézométrique en vert foncé (exemple théorique).....</i>	<i>121</i>
<i>Illustration 67 : Cartographie du critère de retard (pseudo-ZNS) au sein de l'AAC de la ravine Saint-Gilles</i>	<i>122</i>
<i>Illustration 68 : Carte de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de l'AAC du secteur de la ravine Saint-Gilles.....</i>	<i>123</i>
<i>Illustration 69 - Schéma des voies de dégradation et de transfert des produits phytosanitaires.....</i>	<i>125</i>
<i>Illustration 70 - Bassin versant de Montreuil-sur-Epte : carte pédologique (à gauche) et carte d'épaisseur (m) de la ZNS (à droite) (Surdyk et Vernoux, 2012)</i>	<i>128</i>
<i>Illustration 71 - Carte des valeurs de la QL pour l'atrazine (à gauche) et l'acétochlore (à droite) sur le bassin versant de Montreuil-sur-Epte.</i>	<i>129</i>

Liste des annexes

Annexe 1 - Logigrammes permettant de définir la nécessité de mise en œuvre d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité propre aux aquifères karstiques

1 Introduction

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

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

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

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

Un premier guide méthodologique a été élaboré en 2007 afin de répondre à ce besoin (Vernoux et al., 2007). Depuis cette date, de nombreuses études d'AAC ont été réalisées et un premier retour d'expérience a été possible (Vernoux et al., 2011). Par ailleurs, certains aspects peu ou pas pris en compte ont fait l'objet d'études spécifiques : le cas des aires d'alimentation de captages d'eau de surface (Le Henaff et al., 2012), le cas des aires d'alimentation de captages d'eau à transferts mixtes (Catalogne, 2013), les AAC en contexte volcanique, une nouvelle méthode de cartographie de la vulnérabilité en milieu karstique (Dörfliger et al., 2009).

La méthodologie proposée en 2007 n'est pas remise en cause pour autant, elle est simplement adaptée aux connaissances acquises depuis et confronté à sa mise en œuvre dans les études d'AAC. C'est l'objet de cette révision du guide de 2007. Les remarques sur les inévitables limites d'un tel guide restent valables.

Enfin, ce guide ne prend pas en compte les aspects liés aux diagnostics de pression, à la mise en place et au suivi des plans d'action de lutte contre les pollutions diffuses. Pour des informations relatives à l'ensemble de la démarche de protection des captages d'eau potable vis-à-vis des pollutions diffuses, le lecteur pourra consulter le site internet <http://captages.onema.fr/>

2 Concepts et terminologie

2.1 NOTION D'AIRE D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE

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

A l'intérieur d'un bassin versant souterrain, on peut définir une **portion de la nappe d'eau souterraine** alimentant le captage ; elle représente l'ensemble des particules d'eau situé en un endroit quelconque de la zone saturée qui termineront leur course dans le captage. **L'aire d'alimentation d'un captage (AAC)**¹ est le lieu des points de la surface du sol qui contribuent à l'alimentation du captage (Illustration 1). Dans les cas simples, l'aire d'alimentation concerne un seul aquifère et correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage. Considérons le cas (Illustration 2) où la crête piézométrique est décalée par rapport à la crête topographique, délimitant deux bassins à écoulement souterrain opposés. Imaginons alors qu'un captage souterrain (forage) prélève dans le premier tandis qu'une source draine le second. En considérant que la surface située entre la crête topographique et la crête piézométrique est infiltrante (premier schéma), l'AAC du captage ainsi que celle de la source, correspondent toutes deux à la projection à la surface du sol des portions de nappe qui s'étendent de la crête piézométrique au captage ou à la source. Si cette surface était imperméable, l'aire (ou bassin) d'alimentation du captage serait plus réduite au profit de l'aire (ou bassin) d'alimentation de la source, qui serait plus étendue (second schéma). Dans la pratique une surface étant rarement totalement ruisselante ou infiltrante, la zone située entre la crête topographique et la crête piézométrique devrait être prise en compte pour les deux bassins, les deux AAC ayant alors une partie commune.

Dans des cas plus complexes le bassin hydrogéologique prend en compte plusieurs aquifères. L'aire d'alimentation du captage est toujours comprise 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, en fonction des alimentations et des pertes (Illustration 3).

L'aire 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 de l'aire d'alimentation. A l'inverse les zones attenantes (versants en bordure) caractérisées par des écoulements de sub-

¹ Rappel : les termes « aire d'alimentation de captage » et « bassin d'alimentation de captage » sont équivalents. Le terme « aire d'alimentation de captage » est le terme officiel utilisé dans la LOI n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques.

surface ou par du ruissellement diffus s'infiltrant en partie, participent à l'alimentation du captage.

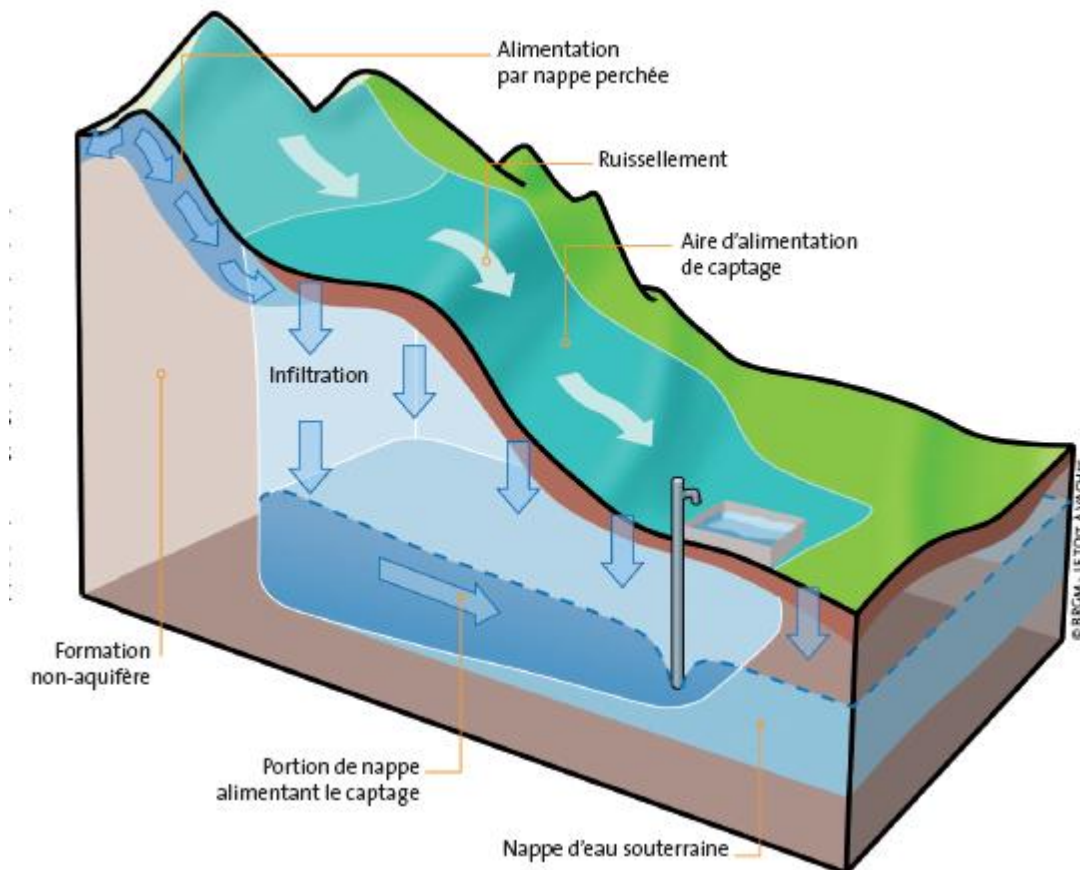


Illustration 1 - Représentation schématique d'une aire d'alimentation du captage

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

A l'inverse l'AAC peut être de dimension plus réduite si la nappe est captive ou libre mais sous recouvrement argileux (Illustration 4). Ces deux cas de figure sont liés à la présence d'une couche imperméable isolant l'aquifère considéré, soit de la surface du sol, soit d'une nappe sus-jacente. Une formation n'étant jamais totalement imperméable, il convient de définir plus précisément cette notion : nous considérerons comme imperméable, une couche dont la perméabilité est inférieure à 10^{-9} m/s (norme utilisée pour les CET).

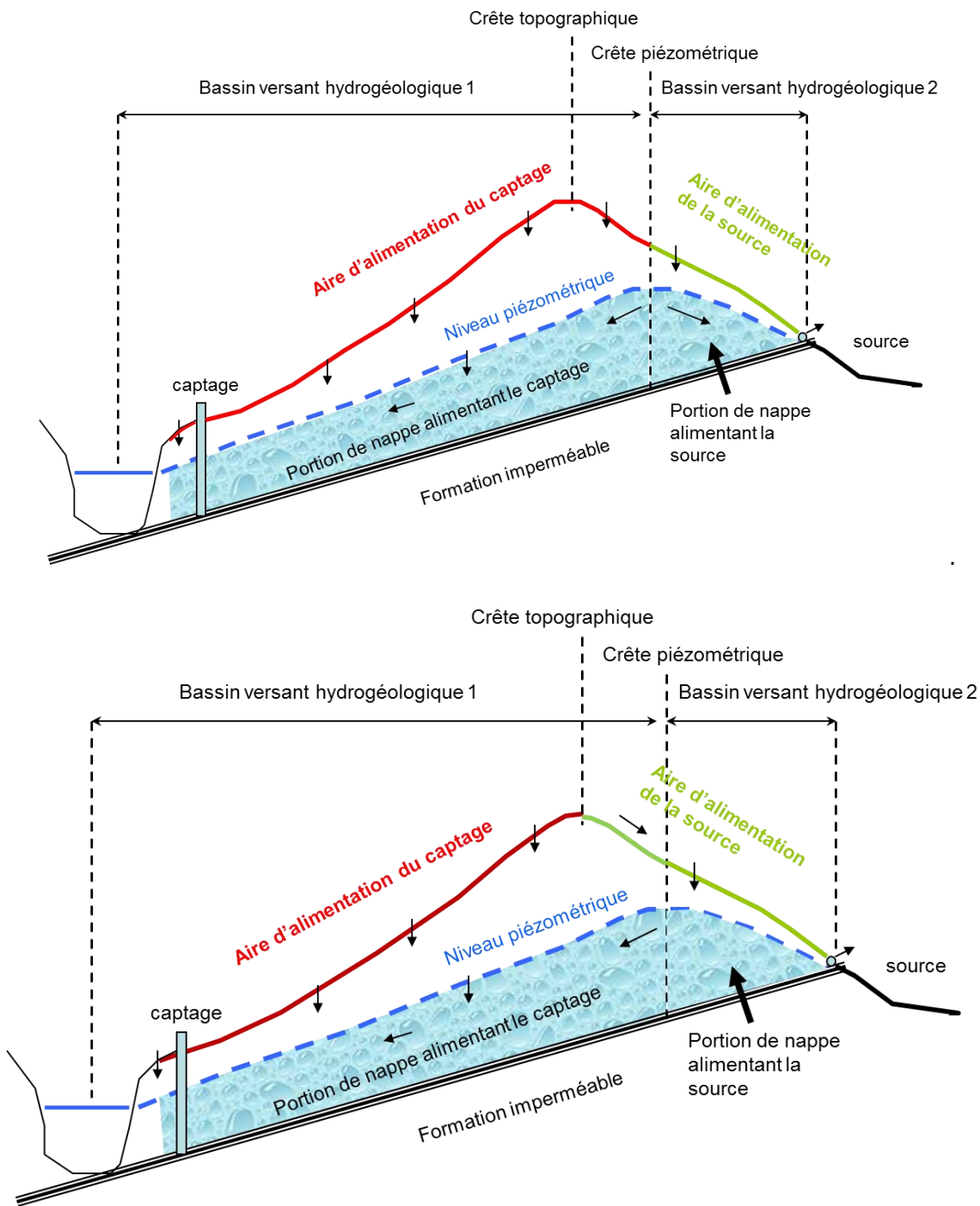
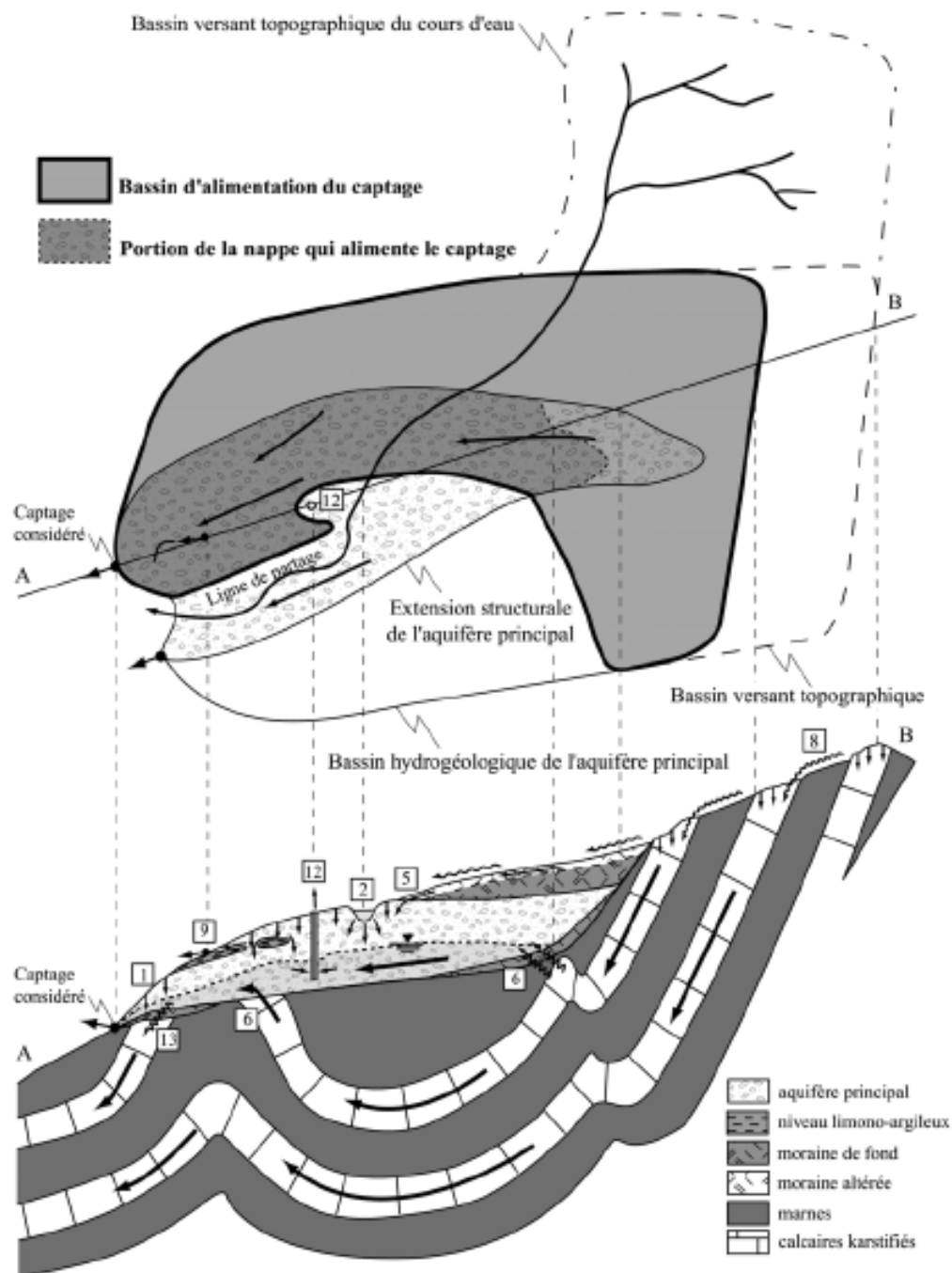


Illustration 2 – Bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre



Alimentations : 1 - Infiltration efficace des eaux météoriques dans la couverture ; 2 - Infiltration des cours d'eau ; 5 - Apport par des écoulements latéraux de subsurface (ou écoulements hypodermiques) qui atteignent l'aquifère principal ; 6 - Apport par d'autres aquifères

Pertes : 8 – Ruissellement ; 9 - Les écoulements de subsurface ; 12 - Les puits de pompage ; 13 - Les pertes dans d'autres aquifères.

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

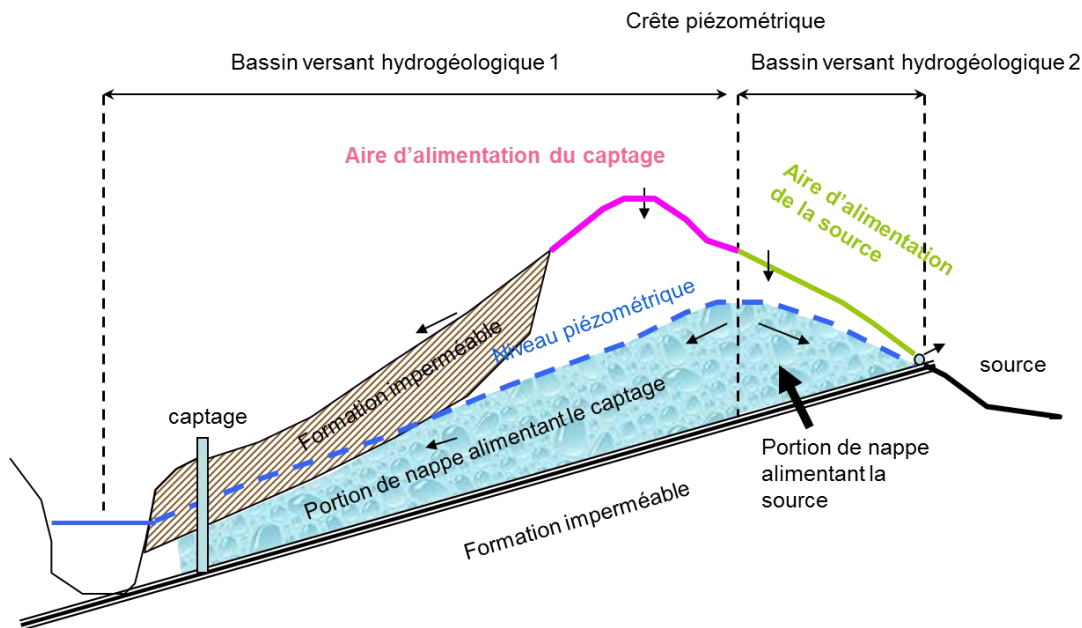


Illustration 4 – Exemple de bassin d'alimentation pour une nappe captive

2.2 NOTION DE VULNERABILITE D'UN CAPTAGE D'EAU SOUTERRAINE VIS-A-VIS DES POLLUTIONS DIFFUSES

Il n'existe pas de définition rigoureuse du terme « vulnérabilité d'un aquifère à la pollution » (Foster et al., 2013) dans la mesure où :

- Tous les aquifères sont à un degré ou un autre vulnérables à une pollution par des contaminants fortement mobiles et persistants ;
- La vulnérabilité est en réalité spécifique à un contaminant et à un scénario de pollution.

C'est une des raisons pour lesquelles on distingue (i) vulnérabilité *intrinsèque* : elle se réfère à la vulnérabilité déterminée sans considération des attributs et du comportement de polluants particuliers et (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. Pour une AAC donnée, la vulnérabilité vis-à-vis de deux pesticides différents ne sera pas la même et elle sera encore différente de la vulnérabilité vis-à-vis des nitrates.

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines basé sur un modèle « origine-écoulements-cible » apparaît bien adapté à notre problématique, à savoir la protection du captage, même si on se limite à la vulnérabilité intrinsèque ; il est décrit comme suit (COST 620 et Goldscheider, 2002) (Illustration 5).

- 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. Du point de vue de la protection de la ressource en eaux souterraines, les écoulements dans la zone non saturée (ZNS) sont considérés. Ils sont dominés par une composante verticale. 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. Du point de vue de la protection de points d'eau (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).

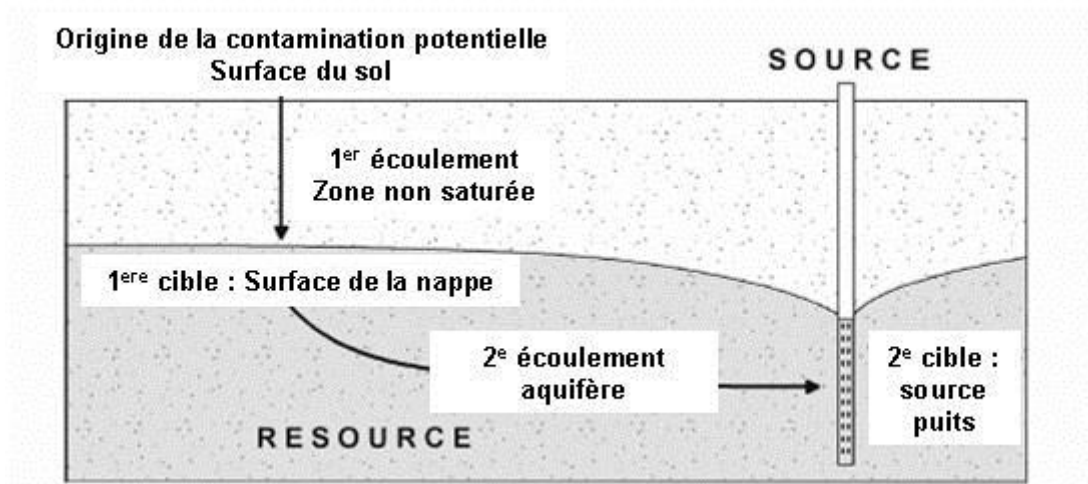
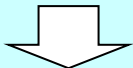


Illustration 5 – Approche européenne de la cartographie de la vulnérabilité basée sur le modèle conceptuel "origine-écoulements-cible" (COST Action 620, 2004)

La vulnérabilité spécifique va concerner plus particulièrement les pesticides. Elle est beaucoup plus difficile à évaluer et elle implique la réalisation d'une carte de vulnérabilité spécifique propre à chaque substance, car les paramètres entrant dans le calcul de la vulnérabilité dépendent des propriétés chimiques des produits et des modalités d'utilisation de chaque substance.

3 Démarche proposée

La démarche proposée est schématisée comme suit

Phase 1 Etude hydrogéologique du bassin versant souterrain 	- Caractéristiques du captage - Synthèse et/ou acquisition de données - Compréhension du système aquifère - Typologie du système - Choix de la méthode
Phase 2 Délimitation de l'AAC 	- Délimiter la portion de nappe alimentant le captage - Identifier la zone en surface susceptible d'influer sur la qualité de l'eau du captage
Phase 3 Cartographie des zones à protéger	- Identifier à l'intérieur de l'AAC les secteurs les plus contributifs à l'alimentation du captage ou les plus sensibles vis-à-vis d'une pollution diffuse

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

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

- Aquifère continu
- Aquifère discontinu fissuré
- Aquifère discontinu karstique
- Aquifère volcanique

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

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

Contexte géologique	Cadre géologique (stratigraphie, lithologie, structure,...).
	Coupes géologiques interprétatives.
Contexte du captage	Coupe géologique et technique de l'ouvrages
	Description de l'ouvrage : profondeur, état (en particulier, problèmes de colmatage), niveau piézométrique, pertes de charge (essai par palier), inspection caméra.
Contexte hydrogéologique	Inventaire des ouvrages situés sur le bassin (en particulier ceux susceptibles de contaminer directement le captage indépendamment de sa vulnérabilité intrinsèque)
	Aquifère concerné.
	Etendue, limites horizontales et verticales, affleurement, épaisseur, niveaux producteurs.
	Profil hydrogéologique du secteur.
	Type de nappe (libre ou captive).
	Type de perméabilité, isotropie des formations géologiques.
	Conditions de recharge (pluie, pluie efficace, affleurements, failles,...). recherche de zones d'infiltration préférentielles
	Modifications anthropiques des conditions naturelles de recharge (canaux, irrigation, bassins d'infiltration, bassins de stockage, exutoires de drainages agricoles ...)
	Piézométrie régionale, piézométrie locale synchrone (hautes eaux et basses eaux), fluctuations piézométriques.
	Sens et vitesse d'écoulement.
	Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité, porosité efficace, coefficient d'emmagasinement), gradient hydraulique, drainance.
	Résultats d'essai (traçage, pompage, perméabilité, diagraphies,...).
	Chronique de débits (pour une source). Pour une source inconnue à capter, suivi à un pas de temps adapté pendant un an et surveillance de sa sensibilité aux orages (turbidité).
	Limites de la zone d'appel du forage, ou de l'aire d'alimentation de la source.
	Relation avec les cours d'eau, distance, alimentation (pourcentage), colmatage,...
	Echanges avec d'autres aquifères.
	Biseau salé (présence, stabilité,...)
	Rôle des failles.

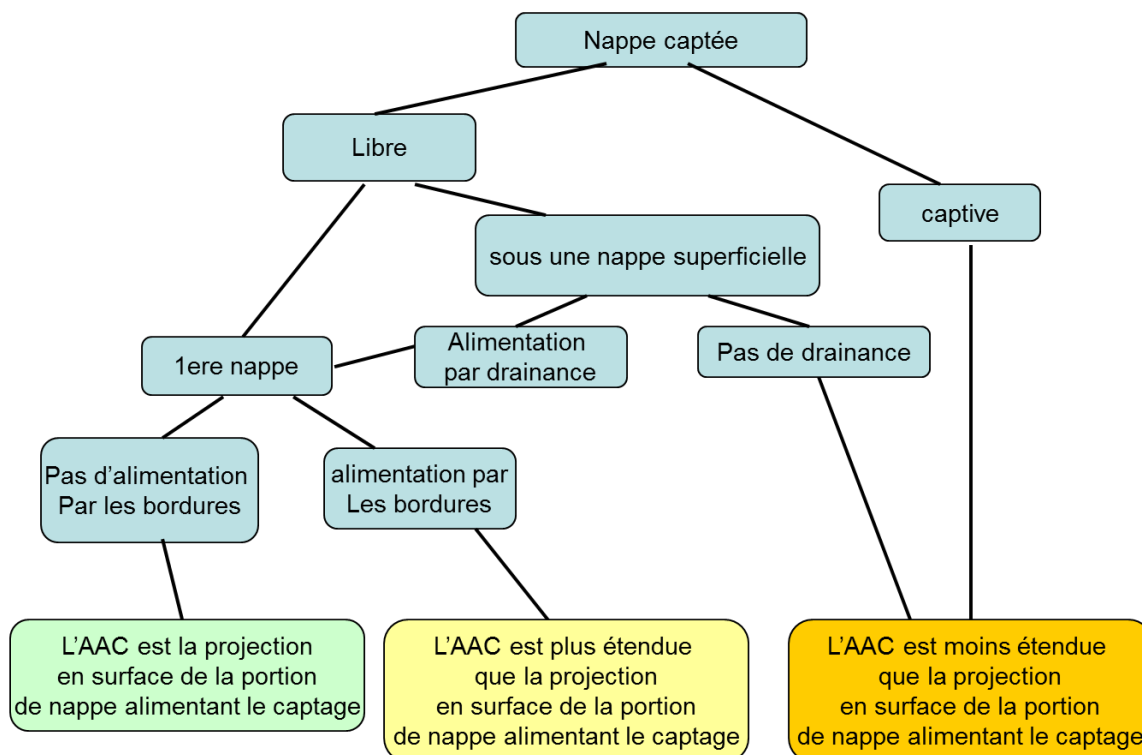
Qualité de l'eau	Historique synthétique des analyses réalisées (sur 5 ans environ, au minimum), pour les ouvrages en exploitation.
	Evolution et fluctuations de la qualité de l'eau, fluctuations hautes eaux / basses eaux, paramètres in situ
	Pour les sources, suivi du débit, de la conductivité et de la température en période de crue
	Interprétation (faciès, anomalies, indices d'infiltration ou de pollution).
	Mesure de contrôle de la qualité de l'eau (paramètres contrôlés, fréquence des mesures).
	Causes probables de pollution (si pollution il y a eu).
	Cartes hydrochimiques (si elles existent).
Vulnérabilité de la ressource	Cartes de vulnérabilité intrinsèques existantes.
	Nature et épaisseur des couches de protection et/ou de la zone non saturée.
	Localisation des zones d'affleurement
	Etudes et cartes agro-pédologiques.
	Risque d'inondation (hauteur, fréquence).
	Perméabilité des terrains superficiels (nature et résultats des essais).
	Points d'absorption naturels ou artificiels (dolines, puits, pertes,...).
	Degré de colmatage des berges des cours d'eau.
	Réseaux de drainage agricole

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

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

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

Ces différents cas sont schématisés comme suit :



Pour une nappe libre, la portion de nappe alimentant le captage correspond, s'il s'agit d'une source, à son bassin versant souterrain², et s'il s'agit d'un forage, à ce qui est communément dénommé aire d'alimentation (Illustration 6). Dans le cas d'un aquifère continu, cette aire d'alimentation peut être calculée par des méthodes analytiques ou numériques. La limite amont de la PNAC correspond à la limite de partage des eaux souterraines (crête piézométrique). Dans le cas d'un système discontinu, la délimitation est faite à partir de sa structure géologique (faille, formation imperméable) et d'essais de traçage.

Quelle que soit la méthode employée pour délimiter l'aire d'alimentation du captage, il importe de prendre en compte l'incertitude sur les paramètres. Une analyse de sensibilité doit être réalisée, de préférence en utilisant la méthode de Monte-Carlo³.

² En supposant qu'il n'y a pas de cône de rabattement créées par des pompages en puits de reprise.

³ La méthode de Monte Carlo vise à calculer une valeur numérique en utilisant des procédés aléatoires. Dans le cas qui nous intéresse, elle permet de générer des distributions aléatoires d'un paramètre, par exemple la perméabilité, entre deux valeurs mini et maxi fixées par l'utilisateur

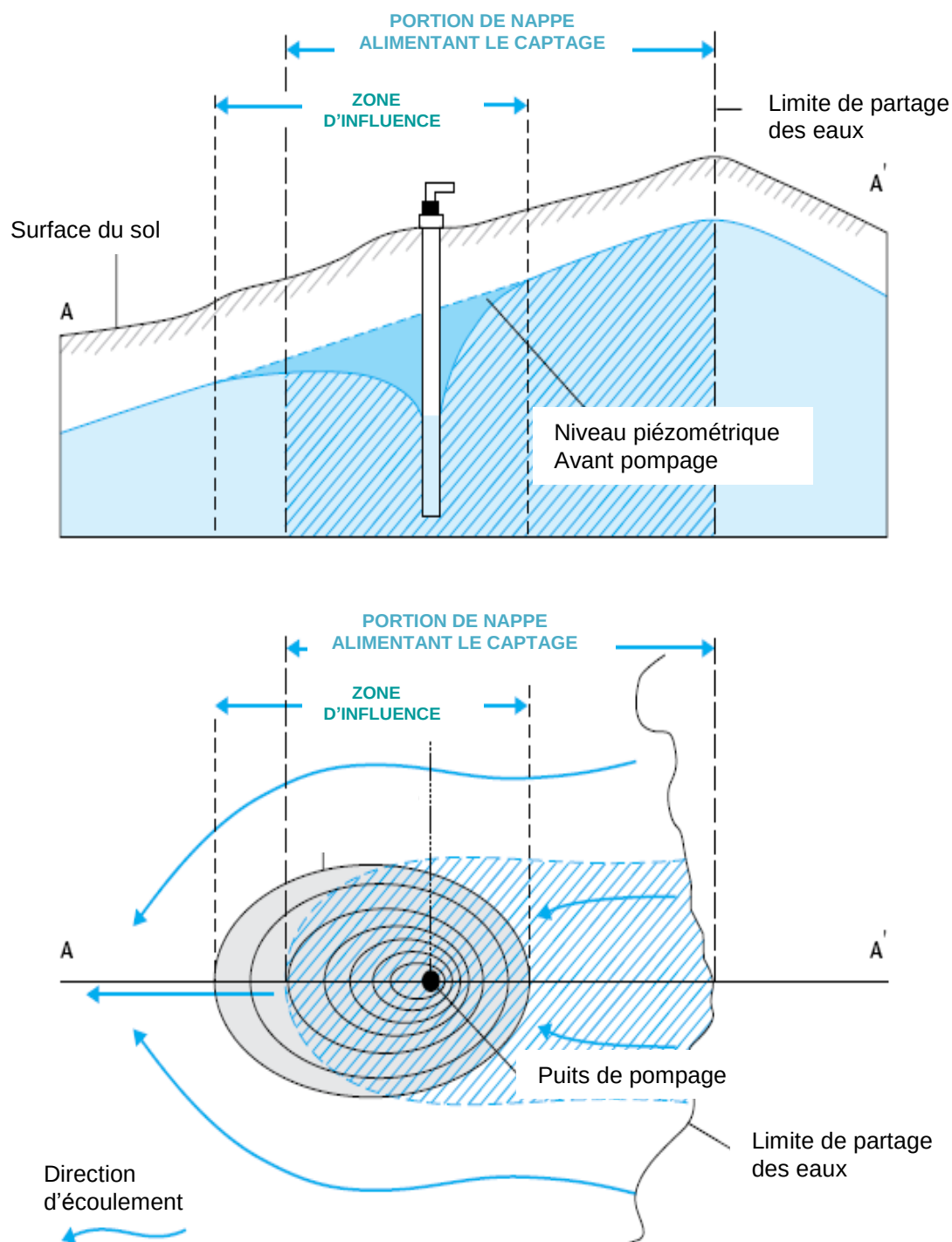


Illustration 6 – Distinction entre portion de nappe alimentant le captage et zone d'influence

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

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

Pour la phase 3 de cartographie des zones à protéger, deux approches sont possibles, la carte de vulnérabilité ou la carte des zones contributives.

Le principal avantage de la carte de vulnérabilité est de pouvoir être réalisée relativement facilement à partir des données issues de l'étude hydrogéologique et pédologique. Elle représente aussi un bon outil de communication entre les hydrogéologues et les gestionnaires de captages. Sa faiblesse est de simplifier des conditions géologiques et des processus hydrologiques naturellement complexes et de ne pas pouvoir être validée (Foster et al., 2013).

Pour cibler les zones prioritaires à protéger, une autre approche peut être envisagée, basée sur une identification des zones qui contribuent majoritairement à l'alimentation en eau d'un captage. Cette approche beaucoup plus complexe à mettre en œuvre et nécessitant un modèle hydrodynamique spatialisé est à privilégier pour de grandes AAC dans des aquifères continus (cf. 5.4).

Pour la cartographie de vulnérabilité, nous proposons de nous limiter dans un premier temps à la vulnérabilité intrinsèque, les paramètres pris en compte variant selon la méthode choisie. La détermination de ces paramètres est explicitée dans les chapitres concernant chaque type d'aquifère. Les illustrations suivantes replacent ces paramètres dans le schéma conceptuel des trois types d'aquifère (Illustration 7). Ces paramètres ont été repris de méthodes existantes et adaptées à la problématique de la protection des captages vis-à-vis des pollutions diffuses. Concernant la vulnérabilité spécifique aux pesticides, une approche a été développée par le BRGM dans le cadre de sa convention avec l'ONEMA (cf. 8). Elle demande néanmoins à être testée pour une mise en œuvre opérationnelle.

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

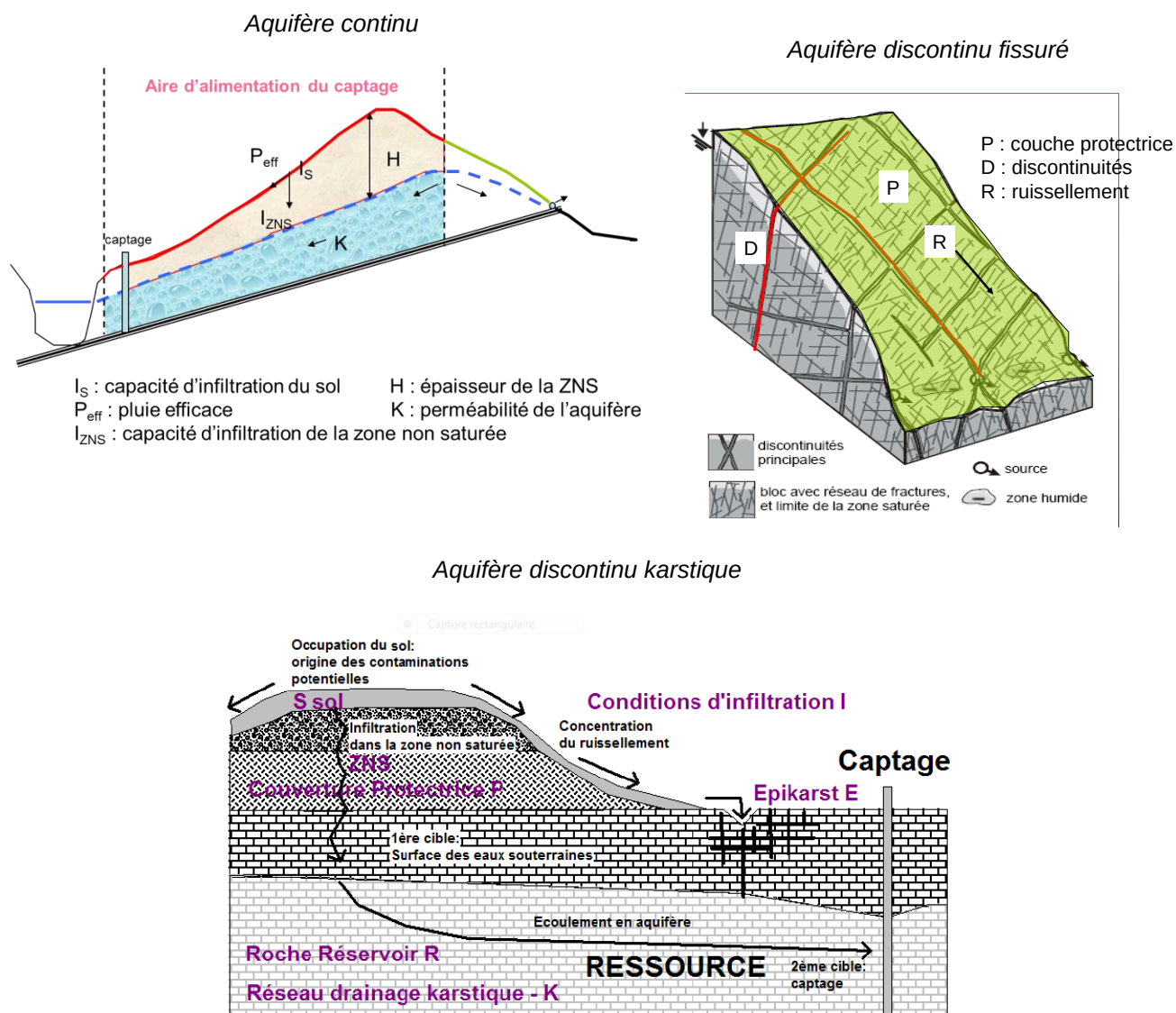


Illustration 7 - Paramètres pris en compte pour le calcul de la vulnérabilité pour trois types d'aquifères

4 Typologie du système aquifère

Une typologie du système aquifère est indispensable pour sélectionner la méthode de délimitation des AAC et la méthode adaptée de caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque du captage d'eau souterraine. Cette typologie est essentiellement basée sur l'hétérogénéité des aquifères (Illustration 8).

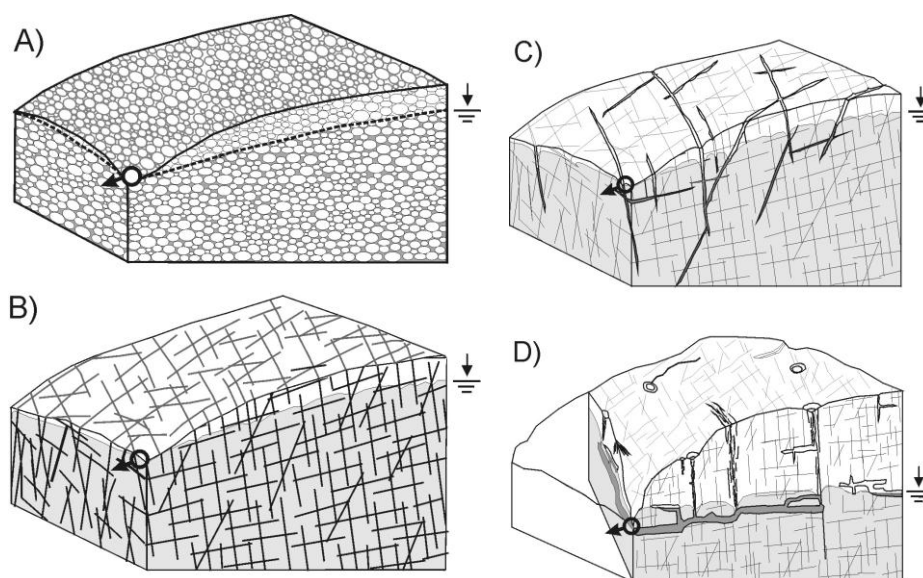


Illustration 8 - Représentation schématique de quatre aquifères caractérisés par une hétérogénéité croissante A) milieu poreux homogène B) milieu fissuré faiblement hétérogène C) milieu fissuré hétérogène D) milieu karstique (in Pochon & Zwahlen, 2003)

4.1 TYPES D'AQUIFERES

4.1.1 Aquifère à porosité d'interstices

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

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

4.1.2 Aquifère karstique

Par définition, les aquifères karstiques se développent dans des formations rocheuses solubles⁴, principalement des carbonates (calcaires, craie, dolomie), ou des évaporites (gypse).. La solubilité de la roche aux circulations d'eau souterraine exacerbe l'hétérogénéité du milieu avec d'une part des fissures élargies par dissolution (les conduits karstiques) très perméables qui assurent la fonction transmissive de l'aquifère et d'autre part les volumes peu perméables (micro-fractures, cavités, porosité primaire) autour des conduits, qui ont une fonction capacitive. De fait l'étude hydrogéologique des aquifères karstiques nécessite l'application d'approches spécifiques à ce contexte (Dörfliger 2010) y compris pour la cartographie de la vulnérabilité (cf. paragraphe 6.3).

Les captages (source ou forage) en aquifère karstique peuvent être classés en trois grandes typologies (Muet et al. 2006) en fonction de la position du captage par rapport aux conduits karstiques et de la superficie de l'aire d'alimentation (Illustration 9).

Critères		Superficie de l'aire d'alimentation (km ²)	
		< 10 km ²	> 10 km ²
Position du captage	Captage de source, forages sur axe de drainage (conduits karstiques), pompage en source	Type 1	Type 2
		Débit annuel moyen faible Systèmes karstiques peu évolués ou peu fonctionnels	Débit annuel moyen fort Systèmes karstiques fonctionnels caractérisés par de fortes variations de débit, des vitesses de transit importantes
	Forage hors des principaux axes de drainages – matrice fissurée	Type 3	
		Aire d'alimentation souvent réduite Surface à protéger fonction du débit de pompage Caractérisation du fonctionnement à partir de l'interprétation des essais de pompage	

Illustration 9 : Classification typologique des captages en milieu karstique (modifié d'après Muet et al. 2006)

⁴ Les tunnels de lave en milieu volcanique constituent une exception. La cavité n'est pas formée par dissolution mais par durcissement différentiel lors du refroidissement de la coulée, la partie supérieure solidifiant tandis que l'intérieur, encore fluide, se vide. Ce phénomène peut conduire dans des cas relativement rares, à la création de conduit de type karstiques (à Hawaï par exemple).

Avant de mettre en œuvre une approche de la vulnérabilité spécifique au contexte karstique, il s'agit de déterminer si l'aquifère carbonaté présente bien une structure et un fonctionnement karstiques. En effet un aquifère carbonaté peut ne pas être karstifié (aquifère fissuré) ou présenter une structure karstique mais un fonctionnement non karstique (dénommé dans ce cas « aquifère karstique non fonctionnel »). Dans ces deux cas, les outils à mettre en œuvre seront ceux utilisés pour les aquifères en milieu fissuré ou continu.

Afin de déterminer si l'aquifère est bien de type karstique fonctionnel, deux phases successives d'étude sont à mettre en œuvre : une phase préliminaire pour déterminer la structure karstique ou fissurée de l'aquifère puis une phase de caractérisation du fonctionnement hydraulique de l'aquifère. Ces deux phases se déclinent avec des approches un peu différentes selon que l'aquifère est de type 1, 2 ou 3. Les phases d'identification puis de caractérisation développées par Muet & Vier 2011 sont présentées en Annexe 1. En résumé il s'agit pour la **phase préliminaire** de s'assurer que l'aquifère capté est bien en contexte carbonaté puis de chercher des informations sur la présence de formes karstiques typiques (bibliographie, base de données nationale Bd cavités - www.bdcavite.net, données spéléologiques, essais de traçage, etc.) ; pour la **phase de caractérisation** du fonctionnement, il convient de disposer de chroniques de débits (ou hauteurs d'eau) et paramètres physico-chimiques sur au moins plusieurs événements hydrologiques ou, dans le cas d'un forage, de données d'essai de pompage. Un aquifère karstique fonctionnel présentera une très grande variabilité spatiale et temporelle des paramètres hydrauliques et physico-chimiques car les temps de séjour des eaux souterraines sont courts, souvent inférieurs à un cycle hydrologique.

L'aquifère karstique possède des modalités d'infiltration particulières qui n'existent pas dans les autres aquifères et qui se décompose en une **infiltration diffuse** et une **infiltration concentrée** au niveau de pertes de cours d'eau, de gouffres, de dolines, ou de vallées sèches. Le processus de recharge est fortement influencé par la structuration verticale de l'aquifère, en particulier par la présence ou non d'une zone sous-cutanée de plusieurs mètres d'épaisseur qui présente une perméabilité et une porosité plus élevée que l'encaissant sous-jacent du fait des processus d'altération et qui permet un stockage temporaire de l'eau. Il s'agit de la **zone épikarstique ou épikarst**. L'épikarst stocke l'eau d'infiltration dans une nappe perchée locale et discontinue, drainée vers la zone noyée principale par des conduits verticaux plus ou moins larges et donc avec des vitesses de drainage plus ou moins rapides.

Par conséquent, lorsque des écoulements de surface contribuent à l'alimentation de la zone noyée à partir de pertes, l'aquifère karstique au sens strict n'est qu'une partie du système karstique, puisque ce dernier est alors constitué de l'aquifère proprement dit et du bassin versant de surface drainé par des pertes. On distingue donc (Illustration 10) :

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

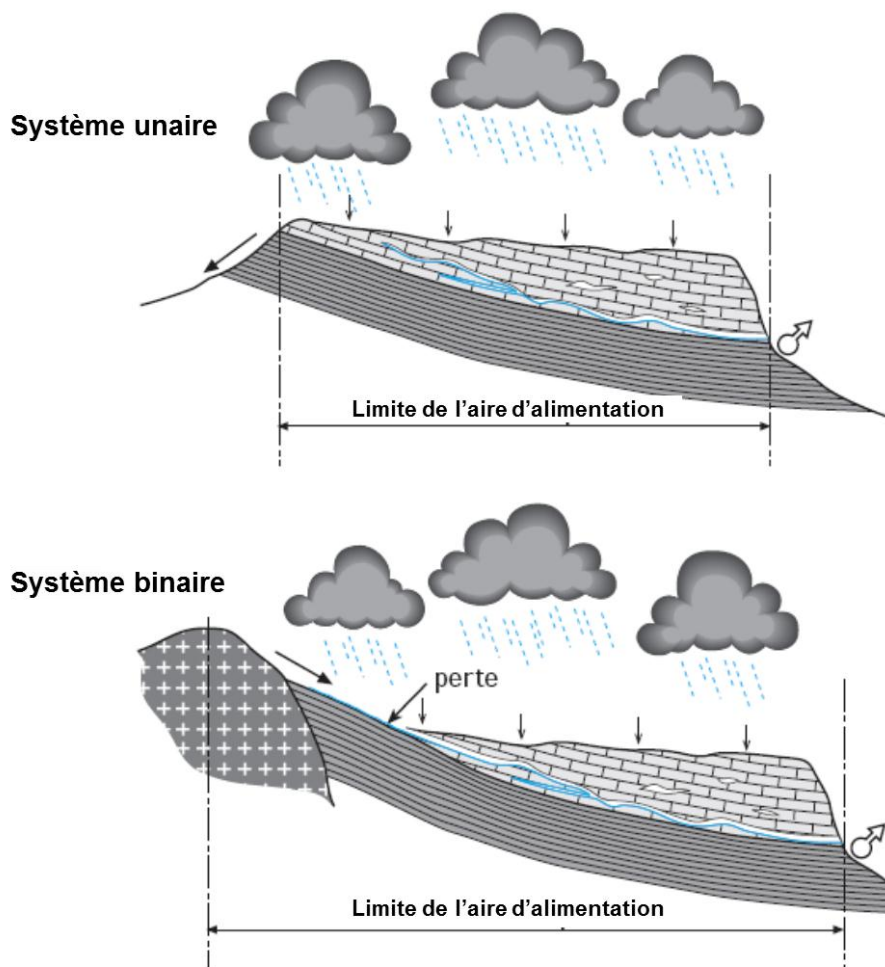


Illustration 10 - Les deux types de systèmes karstiques (modifié d'après AERMC 1999)

4.1.3 Aquifère karstique de la craie

Les aquifères qui se développent au sein de la craie, peuvent être, en fonction du développement de la karstification et de l'évolution du niveau de base, considérés comme des aquifères karstiques ou comme des aquifères de type milieu fissuré. La craie se démarque des autres formations carbonatées de par sa texture fine et sa porosité. Elle constitue un milieu à double porosité primaire très capacitif permettant la constitution de réserves significatives. La fissuration et la fracturation importante de la craie induisent une porosité de fracture qui se traduit par des valeurs de conductivités hydrauliques non négligeables : 10^{-4} à 10^{-6} m/s. Lorsque la craie est karstifiée, des conduits verticaux et horizontaux permettent le transfert rapide des eaux d'infiltration, notamment concentrées au niveau des « bétoures ». L'aquifère de la craie peut être considéré comme un milieu à double voire triple porosité : matricielle à écoulement lent (écoulement pluriannuel), fissurale (recharge annuelle) et karstique (recharge directe en quelques heures via les pertes). Si l'aquifère de la craie est karstifié, ses caractéristiques sont les mêmes que celles présentées dans le paragraphe précédent concernant les aquifères karstiques (domination des écoulements au sein des conduits 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 recouvrement datant du Tertiaire et du Quaternaire ; ces formations sont quasi inexistantes dans la partie orientale du Bassin de Paris. Les formations superficielles sont à prendre en considération pour les aquifères de type craie sous couverture. Elles ont joué un rôle prépondérant dans le développement de la karstification sous-jacente. Ces formations sont soit des dépôts sableux, soit des argiles à silex, soit encore de la craie altérée. De plus, la nature de la perméabilité de ces formations va influencer le type de recharge de l'aquifère. Deux types de formations superficielles sont envisagés :

- les formations superficielles présentent une conductivité hydraulique en grand de type sables. L'eau d'infiltration arrive de manière diffuse au toit de la craie et la dissolution se répartit de manière homogène sur toute la surface, les hétérogénéités étant liées à la présence de fractures ;
- les formations superficielles sont globalement imperméables : soit le toit de la craie est protégé par les formations de recouvrement et ainsi « fossilisé », soit dans le cas d'une hétérogénéité spatiale des formations, des points préférentiels d'engouffrement des eaux provoquent la dissolution de la craie. La dissolution serait davantage contrôlée par la nature de la couverture que par la fracturation.

4.1.4 Aquifère fissuré

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

Dans les aquifères fissurés, ou dits à porosité de fissure, l'écoulement des eaux souterraines s'effectue de manière préférentielle et prépondérante le long des fractures, diaclases, failles, voire au niveau de limites de bancs. De manière générale, le modèle conceptuel suivant peut être proposé (Pochon & Zwahlen, 2003) : (i) présence d'un réseau de discontinuités principales caractérisées par des perméabilités élevées, jouant le rôle de transfert d'eau et de drainage vers les zones d'exutoire ; (ii) le reste du massif peut être considéré comme relativement homogène, caractérisé par une porosité d'interstice (dans le cas de grès, voire de craie) ou de fissures et se traduisant par une perméabilité moindre ; ces volumes de roches assurent la fonction capacitive de l'aquifère ; (iii) la recharge de l'aquifère s'effectue aussi bien au niveau des discontinuités principales qu'au niveau de la roche fissurée moins perméable et (iv) finalement, l'eau captée dans la zone de décharge ou d'exutoire résulte d'un mélange d'eau ayant transité plus ou moins rapidement à travers les discontinuités principales (« eau jeune ») et plus lentement (drainage des discontinuités principales vers les blocs fissurés moins perméables (« eau ancienne »)).

De manière plus spécifique, l'aquifère de socle peut être défini comme suit, avec de haut en bas : (i) parfois une cuirasse ferrugineuse ou bauxitique d'épaisseur métrique, (ii) des altérites meubles résultant de l'altération de la roche originelle, caractérisées par une conductivité hydraulique relativement faible et des capacités de stockage des eaux souterraines significatives, (iii) un horizon fissuré stratiforme de 50 à 100 m d'épaisseur, auquel l'aquifère de socle doit sa perméabilité. L'épaisseur de l'horizon fissuré est environ le double de celle des altérites meubles du profil d'altération (avant érosion). Les propriétés hydrodynamiques au sein des granites sont liées à la présence de fractures majoritairement subhorizontales qui présentent une perméabilité suffisante permettant des « venues d'eau » significatives. D'une perméabilité proche de 10^{-4} m/s, leur extension latérale est comprise entre 5 et 40 m environ.

Des joints sub-verticaux, d'une perméabilité 10 fois moindre en moyenne, contribuent à la connexion du réseau. L'ensemble des autres fractures est à l'origine d'une « perméabilité de blocs », voisine de $5 \cdot 10^{-8}$ m/s, significativement plus forte que la perméabilité de la matrice (10^{-14} à 10^{-9} m/s). Ces blocs assurent 90 % du stockage de l'eau dans l'horizon fissuré. (iv) Le substratum rocheux sain sous-jacent ne présente des perméabilités significatives que très localement et n'offre qu'une très faible capacité d'emmagasinement.

4.1.5 Aquifère volcanique

Les formations volcaniques se caractérisent en règle générale par une structure complexe avec des hétérogénéités présentes de l'échelle cartographique à celle du forage. Les caractéristiques hydrodynamiques (porosités et perméabilités) de ces formations volcaniques varient en fonction :

- de la lithologie : parmi les formations volcaniques non altérées, certaines coulées et certaines formations de type pyroclastites présentent des perméabilités élevées. L'empilement de coulées « laves-scories » répété sur plusieurs centaines de mètres, définit un ensemble potentiellement aquifère. Les roches intrusives (dykes, sills) non fissurées mais également d'autres roches (ignimbrites, trachytes, roches altérées, matériaux zéolitisés...) définissent des milieux aquicludes présentant une faible conductivité hydraulique ;
- des types de perméabilités : il coexiste, au sein des aquifères volcaniques, des perméabilités d'interstices et de fissures. La perméabilité d'interstices est présente aussi bien au sein des formations basaltiques scoriacées, des formations pyroclastiques et volcano-sédimentaires. La perméabilité de fissures s'exprime quant à elle aussi bien dans les laves basiques (basaltes), sous la forme de fissures de refroidissement pouvant atteindre de grandes ouvertures (cm à dm) que dans les laves acides plus visqueuses où elle s'exprime sous forme de figures d'écoulement (Lachassagne et Maréchal, 2004). Il peut être associé à ces perméabilités, une perméabilité de fractures, d'origine tectonique. Exceptionnellement, la présence de tunnels de laves au sein des basaltes fluides, de troncs de végétaux décomposés ultérieurement à la mise en place de la formation qui les a fossilisés (lahars, cendres, etc.) concourent aussi à la perméabilité des roches volcaniques et, parfois à l'émergence de sources. Au contraire, l'existence de structures localisées, imperméables, peut contribuer à compartimenter l'aquifère, en particulier, des faisceaux de dykes imperméables, des paléosols, des intrusions massives et le métamorphisme associé (Lachassagne et Maréchal, 2004) ;
- de la structure interne des coulées (cf. Illustration 11) : des variations verticales de conductivités hydrauliques sont observables au sein d'une même coulée ;
- du degré d'altération : les altérations météoritiques et hydrothermales contribuent à l'hétérogénéité des milieux volcaniques (argilisation et précipitation de minéraux secondaires colmatant les porosités). Ainsi, les formations les plus saines sont fréquemment les plus perméables. En ce sens, il est utile de situer dans le temps les périodes de mise en place des édifices volcaniques.

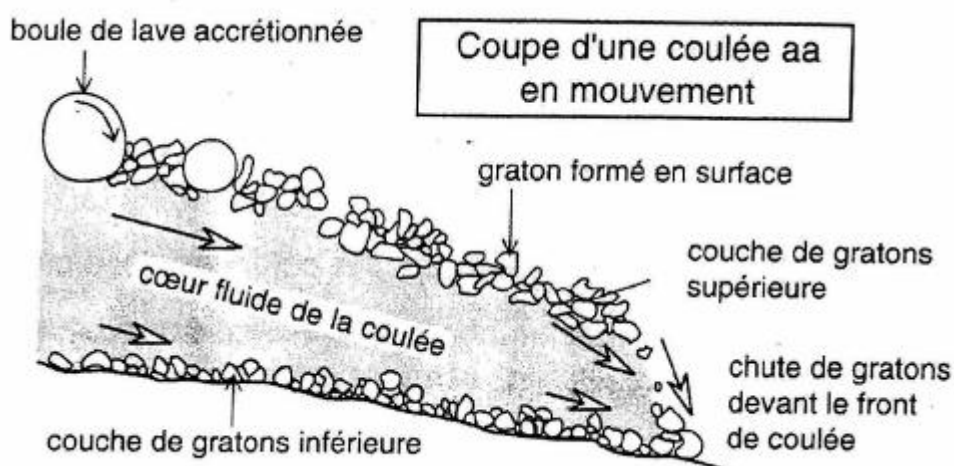


Illustration 11-: Coupe d'une coulée « aa⁵ » en mouvement

Les formations volcaniques comportent une grande diversité de lithologies et de conditions de mises en place, puis d'évolution dans le temps. Cette multiplicité des contextes engendre une forte variété de comportements hydrogéologiques, qui conduit à proposer une approche basée sur un retour d'expériences et non sur une analyse multi-critères comme pour les cas précédents.

4.2 CARACTERISATION DU SYSTEME

Le système aquifère est-il CONTINU ou DISCONTINU ?

La caractérisation de la typologie des systèmes aquifères est résumée à l'aide du tableau de l'illustration 13. Cette caractérisation est subdivisée en quatre parties, à savoir une phase d'identification géologique et une phase de caractérisation hydrogéologique elle-même subdivisée en 3 parties.

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

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

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

⁵ Terme hawaïen désignant une lave fluide, rugueuse et à bloc apparents, s'écoulant à haute température (1000 °C). Elle est dénommée « cheire » en Auvergne et « lave en grats » à la Réunion.

Un système continu est caractérisé par une certaine inertie, l'effet des précipitations sur les variations piézométriques peut se manifester au bout de plusieurs mois. Si les valeurs de piézométrie sur un nombre d'ouvrages significatifs par rapport à l'AAC permettent de représenter en considérant l'effet topographique, des relations eau de surface-eaux souterraines par ex., et que les variations naturelles du niveau piézométrique ne présentent pas de brusques variations au cours du temps (variation de charge journalière inférieure à quelques dizaines de cm et variation saisonnière de l'ordre de 1 à 10 mètres (Illustration 12), le milieu peut être considéré comme CONTINU. Dans certains cas cependant, les fluctuations piézométriques dans un milieu continu peuvent se manifester de manière plus brusque. Les nappes alluviales, alimentées par les cours d'eau, peuvent réagir rapidement (une semaine). Les systèmes captifs réagissent également plus promptement car leur coefficient d'emmagasinement faible confère à certains systèmes hydrodynamiques continus une diffusivité élevée se traduisant par une transmission rapide de l'onde de pression induite par une recharge brusque.

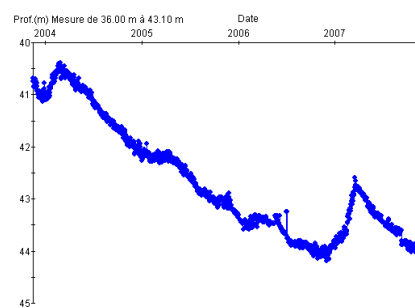
Si les formations sont **carbonatées**, mais que le système est de type karstique non fonctionnel, une approche de milieu continu peut être envisagée. L'aquifère karstique non fonctionnel est un aquifère karstique qui a été soumis à des modifications de la position de son niveau de base. Ainsi, son réseau de drainage est complètement ennoyé, la direction des écoulements souterrains a été modifiée depuis son initiation, résultant d'une transgression marine ou d'un alluvionnement externe bloquant l'ancienne émergence. Ce type d'aquifère possède souvent d'importante capacité de stockage et présente une continuité hydraulique. La continuité hydraulique peut être mise en évidence à l'aide de mesures en continu dans des piézomètres sur la zone d'étude. Dans ce cas, les fluctuations piézométriques ne sont, de manière générale, pas très importantes (Illustration 12) et les différences entre des cartes piézométriques en conditions hydrologiques contrastées sont significatives.

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

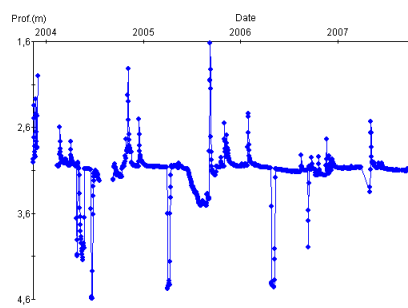
Dans le cas de formations **carbonatées**, il s'agit donc de caractériser l'aquifère karstique au sens strict, considéré comme milieu **DISCONTINU** des aquifères carbonatés fissurés. Un aquifère karstique au sens strict est caractérisé par son fonctionnement qui est déterminé par la structure des vides du réseau de drainage souterrain. Les effets de cette organisation sur le fonctionnement du milieu sont la séparation des fonctions transmissives (au niveau des conduits) et capacitatives (au niveau de la matrice rocheuse fissurée et système annexe au drainage - grandes cavités), l'existence de très forts contrastes de perméabilité, responsables de discontinuités hydrauliques et donc d'une variabilité temporelle et spatiale des paramètres physiques importantes. Les cartes piézométriques ne fournissent pas une réelle information sur l'organisation des écoulements même en augmentant la densité des points d'observation. La loi de Darcy n'est pas valide en tout point de l'aquifère. Le système est caractérisé au niveau des sources par des réponses rapides lors d'événements pluvieux et des variations de grande amplitude des paramètres physico-chimiques. Au niveau des forages, les variations piézométriques enregistrées à un pas de temps inférieur à l'heure, montrent des variations de plusieurs mètres par heure voire par jour (Illustration 12). Les mises en charge sont importantes (plusieurs dizaines de mètres). Les vitesses de transit sont importantes (pouvant atteindre quelques centaines de mètres/h), selon les conditions hydrologiques et la mise en œuvre des essais de traçage artificiels. La connaissance d'un aquifère karstique peut également être appréhendée par la méthode des analyses corrélatoires et spectrales (Mangin, 1984). Cette méthode permet une véritable caractérisation du système karstique et une comparaison des systèmes entre eux. Sa mise en œuvre n'est cependant pas indispensable pour une simple identification du type d'aquifère. C'est la raison pour laquelle elle n'est pas décrite ici.

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

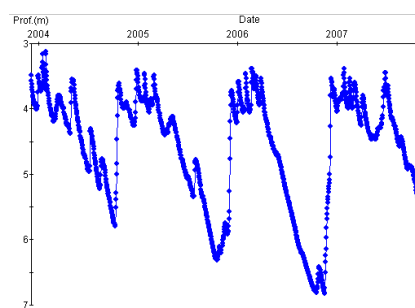
Enfin, il faut signaler que dans la nature, les milieux peuvent être à la fois discontinus et continus, même lorsqu'il ne s'agit pas de karst (milieux à doubles porosité ou milieux à perméabilités multiples). C'est le cas en particulier des formations volcaniques. Dans l'approche du guide méthodologique,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



1. aquifère continu
Piézomètre, Montereau-sur-le-Jard, 77



2. aquifère discontinu karstique
Piézomètre de résurgence de la
Fontaine de Nîmes, 30



3. aquifère discontinu fissuré
Piézomètre de BELLEVUE, Pommerit-
Jaudy, 22

Illustration 12 – Exemple de fluctuations piézométriques (2004-2007) au fonction du type d'aquifère

Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses – *Version révisée du guide méthodologique*

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

Illustration 13 – Tableau d'aide à la caractérisation des aquifères

5 Cas d'un système aquifère continu

5.1 ÉTUDE ET CARACTÉRISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGÉOLOGIQUE

L'étude hydrogéologique préalable à la délimitation de l'AAC doit permettre de répondre à plusieurs questions :

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

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

5.2 DÉLIMITATION DE L'AAC

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

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

1. Le captage est une source et n'est pas soumis à des circulations rapides (pas de zone d'appel).

2. La connaissance du système aquifère tend à montrer que l'écoulement suit une direction principale, sans écarts notables, notamment dus à des pompages dans l'aquifère (zone d'appel simple). Aucune rivière n'est drainée – naturellement ou artificiellement – par la nappe. A posteriori, on s'assure que la PNAC délimitée reste dans les limites latérales du bassin versant hydrogéologique.
3. L'écoulement dans l'aquifère ne suit pas une direction principale ou des pompages influent sur cet écoulement ou bien l'on sort du bassin versant hydrogéologique ou la nappe draine un cours d'eau. L'aquifère contient potentiellement une nappe dont le caractère captif ou libre varie selon les secteurs de la zone étudiée. Il interagit potentiellement avec d'autres aquifères.

La surface minimum de l'AAC peut être estimée par un bilan hydrologique annuel (cf. § 6.2.3). Elle est par définition très variable selon les contextes hydrogéologiques, de quelques hectares pour des sources en milieu de socle à plusieurs centaines de km² dans certains aquifères karstiques ou certains aquifères poreux des grands bassins sédimentaires.

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

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

Dans le cas d'une source captée sans modification des écoulements souterrains, la PNAC correspond au bassin versant hydrogéologique de la source. Celui-ci peut être tracé à partir d'une carte piézométrique d'échelle adaptée aux surfaces en jeu et aux possibilités de mesures piézométriques. En particulier, les cartes hydrogéologiques départementales à l'échelle du 1/100.000 ne peuvent être utilisées en l'état sur des bassins versants d'une dizaine de km².

L'AAC sera déterminée selon les règles définies dans le chapitre 3, sous réserve que la source soit bien protégée des eaux de ruissellement. En cas contraire, l'AAC devra intégrer le bassin versant topographique de la source.

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

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

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

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

$x = \frac{y}{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi T J}{Q} y\right)}$ $L = \frac{Q}{T.J}$	T : Transmissivité (m²/s) J : gradient hydraulique (-) Q : débit du captage (m³/s) L : largeur du front d'emprunt (m)	
--	---	--

Illustration 14 – Calcul de l'extension d'une zone d'appel par approche analytique

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

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

Un outil développé sous Excel⁶ est présenté dans le chapitre 0 de ce guide. Les équations analytiques fixant le captage en un point de coordonnées (0,0), les résultats obtenus sont à reporter ensuite dans un SIG. A cet effet, l'outil fournit – dans le système de projection Lambert métrique dans lequel sont connues les coordonnées du captage – les coordonnées des points des courbes enveloppes. On s'assure a posteriori que l'extension obtenue pour la PNAC n'inclut pas des captages susceptibles d'influencer les écoulements et ne sort pas des limites latérales du bassin hydrogéologique. Si tel était le cas, il serait alors nécessaire d'utiliser un modèle maillé. Un outil de contour théorique d'une zone d'appel en fonction du sens d'écoulement, du gradient et de la transmissivité de la nappe sera prochainement disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/>.

L'AAC est ensuite déterminé selon les règles fixées au chapitre 4.

⁶ Un outil du même type fournissant le contour théorique d'une zone d'appel en fonction du sens d'écoulement, du gradient et de la transmissivité de la nappe devrait être prochainement disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/>.

5.2.3 Cas n°3 : délimitation par modélisation maillée

Lorsque l'aquifère ne présente pas des écoulements mono-directionnels – ce qui est en pratique souvent le cas, il est suggéré de s'appuyer sur une modélisation numérique spatialisée des écoulements souterrains.

La spatialisation de la géométrie de l'aquifère ou des aquifères concerné(s), des paramètres hydrodynamiques associés, la prise en compte des captages éventuellement présents dans le secteur, des relations nappe-rivière, etc. permettent en effet de représenter l'impact des prélèvements effectués au captage étudié sur les écoulements souterrains.

Il est donc possible de déterminer l'extension de la zone d'appel en traçant des trajectoires inverses, c'est-à-dire des trajectoires suivies par les molécules d'eau qui finissent leur course au niveau du captage lorsque celui-ci est en condition de pompage. La zone d'appel permet ainsi d'identifier la partie de l'aquifère qui contribue au renouvellement des eaux prélevées par le captage.

En fonction de la complexité du milieu concerné, le milieu peut être représenté par un système monocouche à nappe libre et/ou captive, par un système multicouche composé de formations de perméabilité horizontale et verticale distinctes. Le degré de complexité de la modélisation est à déterminer en fonction du contexte hydrogéologique et de la finalité prévue pour l'utilisation du modèle.

Comme tout domaine d'activité, la modélisation hydrogéologique obéit à un état de l'art qu'il convient de respecter. Il est vivement suggéré de se reporter au rapport publié récemment par le BRGM à ce sujet (Barthelemy et Seguin, 2013). On retiendra en particulier qu'une modélisation spatialisée des écoulements souterrains nécessite :

- des données (géologie, piézométrie, débits) sans lesquelles le travail ne pourra être effectué correctement ;
- une compréhension hydrogéologique initiale minimale : si un travail de modélisation peut permettre de confirmer ou d'infirmer certaines hypothèses, elle doit être considérée dans ce type d'étude comme la transcription numérique d'une compréhension hydrogéologique déjà établie ;
- une démarche de travail respectueuse des règles de l'art en la matière, en s'assurant en particulier de la capacité du modèle numérique conçu à reproduire les comportements hydrogéologiques observés.

De façon générale, la modélisation hydrogéologique n'est pas une fin en soi. Son intérêt n'est réel que lorsque l'on peut accorder une confiance raisonnable au travail qui a été effectué. En d'autres termes, il est vain de chercher à modéliser spatialement un aquifère dont le fonctionnement hydrogéologique serait mal cerné et dont on ne connaîtrait ni la géométrie, ni la ou les zone(s) de recharge et encore moins le ou les exutoire(s).

La grande majorité des modèles hydrodynamiques utilise une approximation en différences finies ou en volumes finis pour simuler un écoulement transitoire en trois dimensions dans un milieu poreux hétérogène et anisotrope. Parmi les logiciels existants, on peut citer MARTHE développé par le BRGM, MODCOU développé par l'Ecole des Mines de Paris et MODFLOW développé par l'USGS.

On attachera une importance particulière à identifier le sens des échanges entre la nappe et les cours d'eau éventuellement présents au voisinage du captage considéré. Cette qualification peut s'appuyer sur la modélisation effectuée qui peut fournir l'orientation des lignes de courant, ainsi que le débit entrant dans l'aquifère à partir du cours d'eau. Il est fortement suggéré de confirmer les estimations numériques par une estimation de l'origine des eaux pompées à l'aide d'un traceur hydrochimique ou par défaut, par analyses isotopiques. Un suivi de température des eaux de la nappe, de celles du cours d'eau et des eaux prélevées par le ou les captage(s) peut permettre d'approcher la contribution des eaux de surface aux volumes prélevés. Outre l'information directe apportée pour un débit de pompage donné, ces informations de terrain permettent en effet également de contribuer au calage du modèle hydrodynamique.

Dans le cas où la rivière alimente la nappe se pose la question de l'intégration de son bassin versant dans l'AAC. Dans le cas d'un petit bassin versant avec une forte contribution à l'alimentation de la nappe, le bassin versant hydrologique sera intégré à l'AAC. A l'inverse, il n'apparaît pas réaliste d'intégrer la totalité du bassin versant d'un grand cours d'eau (exemple d'un captage dans les alluvions de la Seine). Un choix s'impose donc et la délimitation retenue peut s'avérer délibérément inférieure à l'AAC réelle. Afin de garder en mémoire ce choix, il est proposé d'utiliser une symbolologie légèrement différente en accolant un astérisque au terme AAC : on parlera d'AAC*.

5.2.3.1 Exemple d'application : le captage de Blainville-sur-Orne

La prise en compte du bassin versant d'un cours d'eau et l'utilisation d'un modèle hydrodynamique peuvent être illustrées par le cas d'un captage situé sur la commune de Blainville-sur-Orne dans le Calvados. Ce captage (indice BSS : 01201X0002) capte les eaux de l'aquifère des calcaires du Bathonien. Il est proche d'un autre captage (indice BSS : 01201X0156) qui capte la même formation à une distance de moins de 500 m (cf. Illustration 15).

Un modèle hydrodynamique (réalisé avec le logiciel MARTHE) permet de simuler les trajectoires suivies par les particules d'eau qui sont captées par les deux ouvrages. Le faisceau de trajectoires correspondant à l'ouvrage 01201X0002 est contraint par celui du captage voisin : il serait plus étendu vers le sud-ouest en son absence. Le modèle hydrodynamique permet donc de rendre compte de l'influence des pompages sur l'extension des zones d'appel.

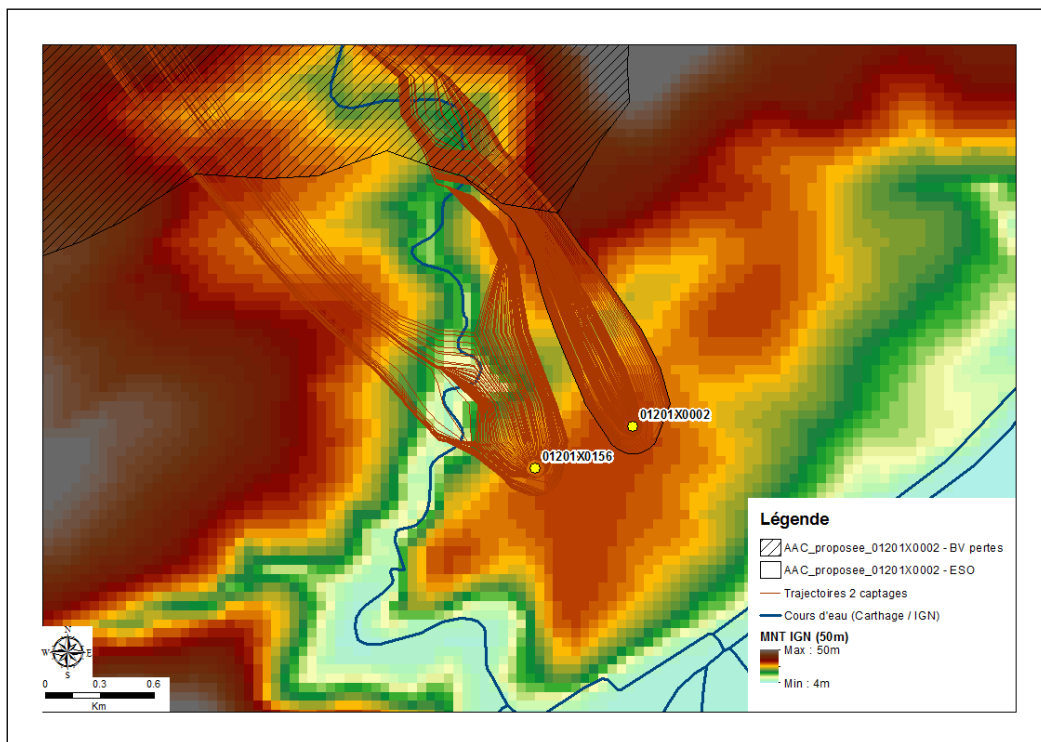


Illustration 15 – Captages de Blainville-sur-Orne – trajectoires inverses simulées

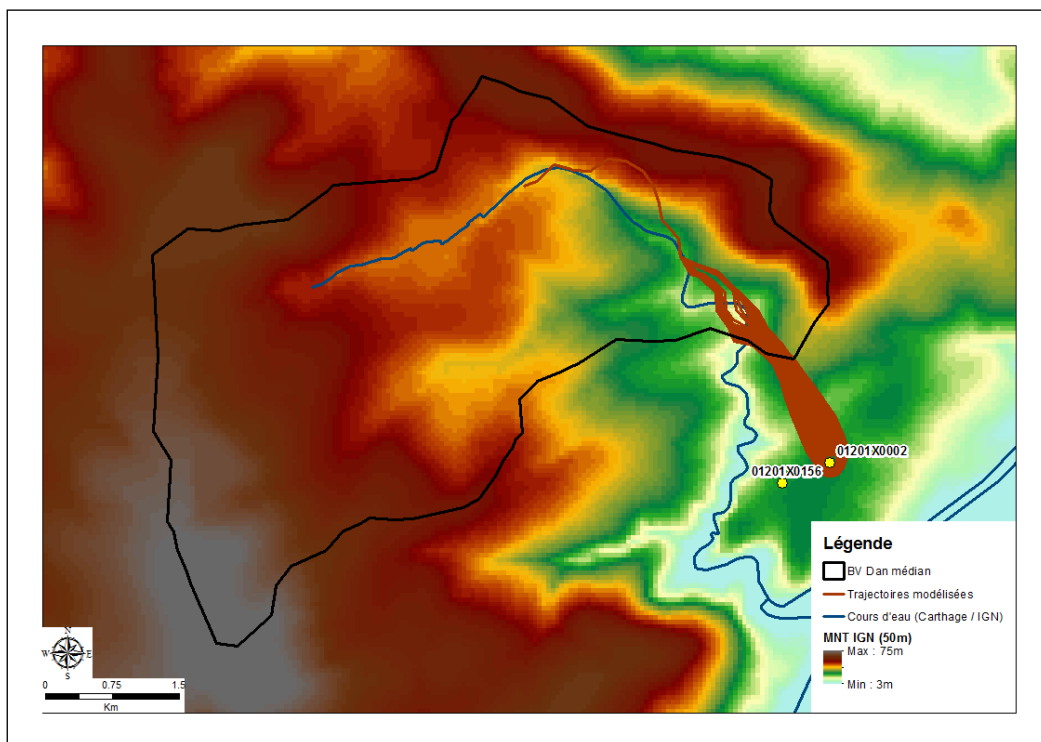


Illustration 16 – Captage 01201X0002 de Blainville-sur-Orne – trajectoires inverses simulées

Les trajectoires inverses simulées pour le captage 01201X0002 (cf. Illustration 16) se concentrent vers l'amont au niveau d'un cours d'eau (le Dan) : le modèle simule donc une alimentation de l'aquifère par le Dan. Ceci est bien cohérent avec la connaissance de son fonctionnement, dont on sait qu'il connaît des pertes dans le secteur de Périers-sur-le-Dan.

En conséquence, la délimitation proposée pour l'AAC (cf. Illustration 17) comporte deux secteurs :

- dans sa partie amont (zone hachurée), l'AAC est composée par le bassin versant topographique des pertes du Dan situées au niveau de Périers-sur-le-Dan, le captage de Blainville-sur-Orne étant alimenté par les eaux de surface qui s'infiltrent à ce niveau. Dans ce secteur, on s'intéresse essentiellement à la préservation de la qualité des eaux écoulées dans le cours d'eau, sachant néanmoins qu'une partie de son alimentation provient des eaux souterraines ;
- dans sa partie aval, l'AAC est composée de la zone d'appel du captage de Blainville, qui remonte vers l'amont jusqu'au niveau des pertes du Dan. Dans ce secteur, il s'agit de préserver la qualité des eaux souterraines puisqu'il est intégré dans l'AAC en tant que portion de nappe alimentant le captage.

L'AAC ainsi délimitée pour le captage 01201X0002/F1 a une superficie de 24,5 km².

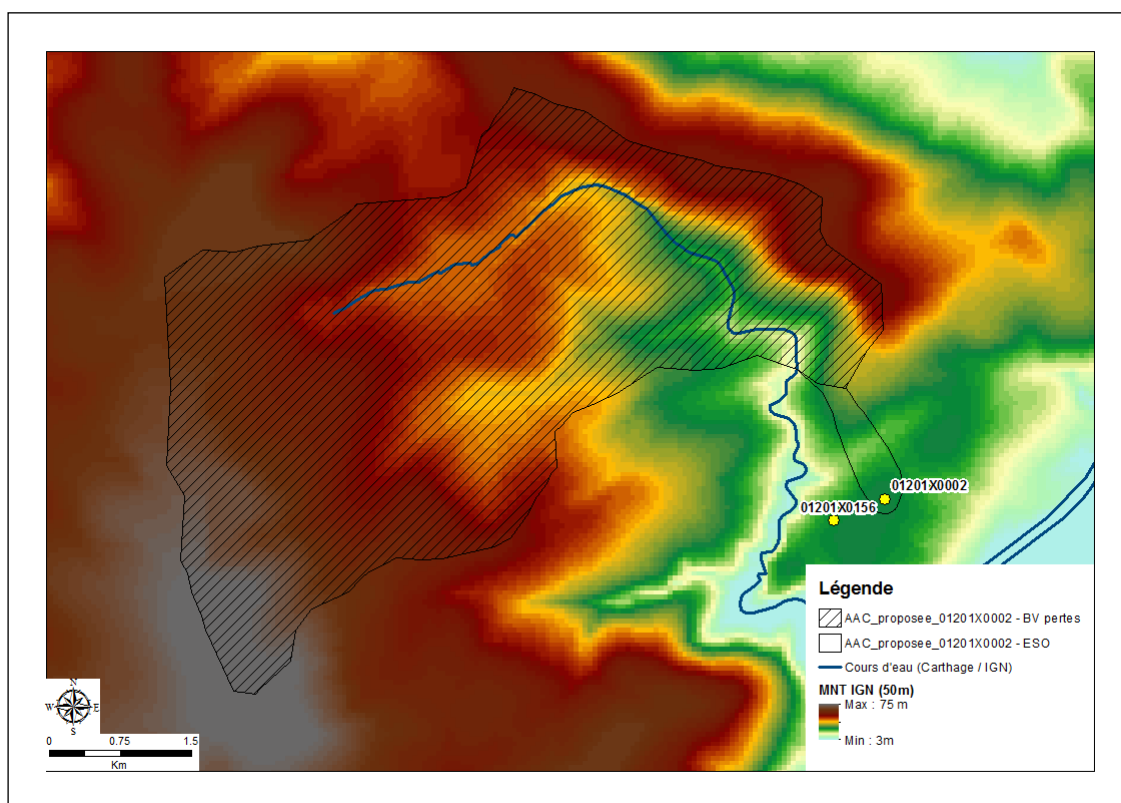


Illustration 17 – Captage 01201X0002 de Blainville-sur-Orne – AAC proposée

5.2.3.2 Exemple d'application : le captage des Bordes

Dans le cas d'un aquifère alluvial, la zone d'appel du pompage peut s'étendre sur des distances extrêmement élevées vers l'amont. Il est donc en pratique nécessaire de trouver un compromis entre l'exhaustivité de l'AAC et l'identification des secteurs les plus contributifs et les plus proches de l'ouvrage. On utilisera de fait la symbologie « AAC* ».

Le cas des captages des Bordes (ANTEA, GINGER, CALLIGEE (2009) illustre ce questionnement. Il constitue par ailleurs un exemple d'intégration, dans l'AAC*, d'une zone ruisselante alimentant la zone d'appel des captages.

Les captages prélèvent de l'eau dans l'aquifère des Sables Infra-Molassiques (SIM), au voisinage immédiat des alluvions du Gave de Pau, dont la nappe alimente directement l'aquifère capté. La zone d'appel du prélèvement a été simulée à l'aide d'un modèle tri-couches élaboré avec le logiciel MARTHE, en traçant les trajectoires inverses depuis l'emplacement des prélèvements. Elle s'étend sur plusieurs kilomètres de long, jusqu'à atteindre la limite de la zone modélisée (cf. Illustration 18). En pratique, elle se poursuit plus à l'amont encore.

L'Illustration 19 présente l'extension proposée pour l'AAC*. On note la distinction entre une partie « alluviale » et une partie située sur les coteaux, contribuant à l'alimentation de la partie alluviale par ruissellement, et délimitée sur une base topographique. La crête piézométrique amont de la nappe alluviale étant située très à l'amont, la limite amont de l'AAC* a été définie parallèlement à une ligne isopièze de la nappe alluviale, de façon à délimiter une zone de superficie suffisante pour équilibrer les prélèvements effectués au niveau des captages (aucun déficit n'est constaté sur cette zone). Ce découpage amont délimite un territoire qui couvre une superficie de 7,5 km².

La superficie a été déterminée en se basant sur une recharge de 324 mm (85% de la pluie efficace dans la zone alluviale), un volume prélevé de 2.26 Mm³/an et en constatant l'absence de déséquilibre sur les ressources en eau souterraine dans ce secteur, ce qui garantit que ces prélèvements sont compensés par des apports annuels au minimum équivalents.

Notons que le calcul majore la superficie nécessaire à l'équilibrage du bilan hydrologique dans la mesure où il ne prend en compte ni l'infiltration en zone alluviale des eaux de pluie ayant ruisselé sur les coteaux, ni les apports par le cours d'eau ou par la nappe alluviale située à l'amont de la zone délimitée. Rappelons par ailleurs que la méthode permet d'identifier une superficie minimale mais en aucun cas la superficie exacte.

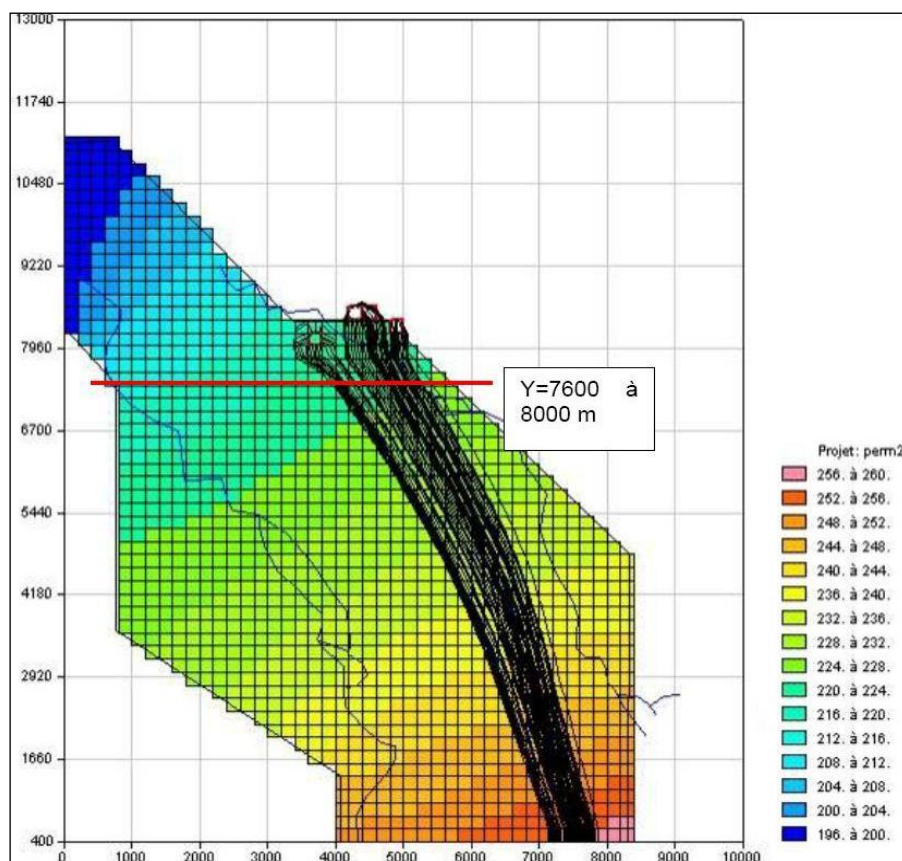


Illustration 18 – Captage des Bordes – trajectoires inverses simulées en nappe alluviale (les coordonnées et la piézométrie sont exprimées en mètres)

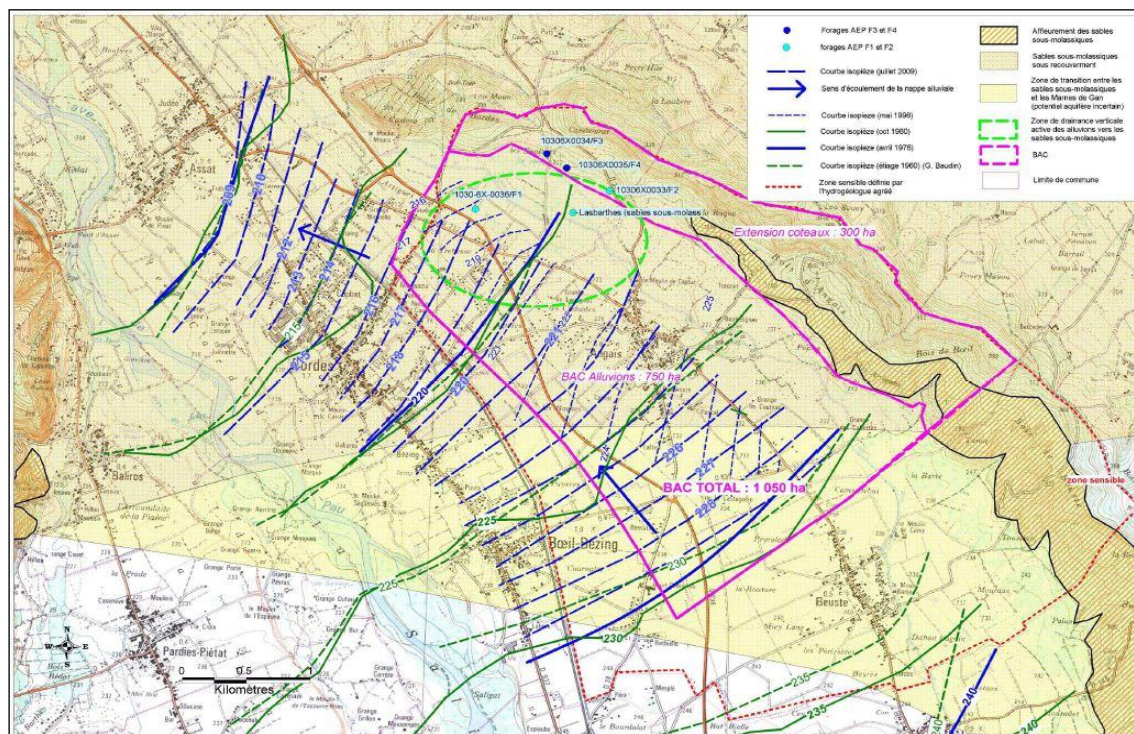


Illustration 19 : Extension de l'AAC* et sous-découpage en deux parties : alluviale et de coteaux

Si cette approche ne suit pas précisément la méthodologie proposée dans la mesure où l'on exclut une partie de la zone d'appel, elle répond cependant à une approche pragmatique dans laquelle un compromis est trouvé en termes d'identification des zones les plus contributives à l'alimentation du captage, tout en s'affranchissant d'une extension vers l'amont déraisonnable. Ainsi, si la qualité de l'eau souterraine entrant dans cette zone n'est pas garantie, les apports par la recharge en permettent la dilution.

5.3 CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ

5.3.1 Choix de la méthode

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

La prise en compte de la nature des polluants dans la cartographie de la vulnérabilité suppose donc de dresser plusieurs cartes, prenant en compte les spécificités liées aux différentes espèces (cf. chapitre 8). Le sol est dans cette approche un élément moteur prépondérant.

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

5.3.2 Paramètres pris en compte

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

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

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

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

Pour chacun des paramètres pris en compte, il convient de s'interroger sur la pertinence et l'exhaustivité des données qui permettent de le définir. Pour prendre un exemple simple, si 90% des sources identifiées sur un territoire donné sont situées dans le secteur Nord-Est, est-ce représentatif du fonctionnement hydrogéologique du territoire ou est-ce dû au fait qu'un inventaire complet a seulement été effectué dans le secteur Nord-Est ? Ce questionnement est particulièrement valable pour les méthodes proposées pour des milieux discontinus, dans

lesquelles on cherche à identifier des connections préférentiels entre le captage et des discontinuités, mais elle pourrait s'avérer pertinentes également pour des milieux continus, par exemple pour la cartographie de la perméabilité de l'aquifère.

Les paramètres pris en compte sont les suivants :

- Pluie efficace
- Couverture pédologique
- Capacité d'infiltration de la zone non-saturée
- Epaisseur de la zone non-saturée
- Perméabilité de l'aquifère

a) Pluie efficace, P, exprimée en mm/an (moyenne interannuelle)

Ce paramètre représente le « moteur » de l'infiltration, sans préjuger de la part constituée par cette dernière (la pluie efficace regroupant le ruissellement et l'infiltration) : plus le volume d'eau disponible pour l'écoulement est important, plus l'infiltration peut s'avérer importante, sous réserve que la nature des terrains présents le permette.

Classiquement, on calcule une pluie efficace sur la base d'une pluie, d'une évapotranspiration (ETP) et de la capacité maximale de stockage du sol. En l'absence de prélèvements importants et dans les cas d'une bonne cohérence entre bassins versants hydrogéologique et topographique, le module du cours d'eau exprimé en mm peut aussi permettre de fixer l'ordre de grandeur de la pluie efficace moyenne sur ce territoire.

Il paraît peu réaliste de vouloir discrétiser ce critère à l'échelle d'un territoire de quelques km², voire quelques dizaines de km², d'autant plus si ce dernier présente une altimétrie relativement homogène. L'ETP et probablement aussi la pluviométrie sont dans ce cas peu sujets à variabilité significative lorsque l'on calcule une moyenne interannuelle de la pluie efficace.

En l'absence d'éléments permettant une discrétisation de la pluie efficace, on pourra considérer sa valeur constante sur l'ensemble de la zone et la calculer à partir des données disponibles aux stations Météo France les plus représentatives du secteur.

Dans le cas où l'AAC comporte une partie ruisselante contribuant au renouvellement de la ressource en eau dans l'aquifère (par une infiltration des eaux de ruissellement vers l'aval), ce paramètre de « pluie efficace » devra être étendu à une notion plus large de « lame d'eau potentiellement disponible pour l'infiltration ». Cette lame d'eau correspond alors au cumul de la pluie efficace tombant directement à l'aplomb de la zone concernée et de l'apport par ruissellement de la zone ruisselante située à l'amont.

Prenons, comme exemple, le cas d'une plaine alluviale de très faible pente, encadrée par un relief pentu (pentes > 30%) constitué d'une formation marneuse très peu perméable (cf.

Illustration 20). En première approximation, on peut considérer que l'essentiel de la pluie efficace tombant sur le relief va ruisseler et venir s'accumuler au pied des reliefs, en bordure de la zone alluviale, de façon plus ou moins diffuse (selon l'organisation en thalweg(s) du relief). Considérons que le bassin versant du relief orienté vers la plaine alluviale est de 30 000 m², que la surface de la plaine alluviale alimentée par ce relief est constituée par une bande de 100 m de large sur 1000 m de long (soit une superficie de 100 000 m²) et que la pluie efficace interannuelle moyenne sur le relief est de 400 mm. La lame d'eau arrivant par ruissellement sur la bande de plaine alluviale concernée est alors de 120 mm.

La pluie efficace en plaine alluviale étant de 300 mm, la « lame d'eau potentiellement disponible pour l'infiltration » sur la bande alluviale sera de 420 mm.

Notons que la partition de cette lame d'eau entre infiltration et ruissellement est ensuite régie par les paramètres S et I de la zone concernée.

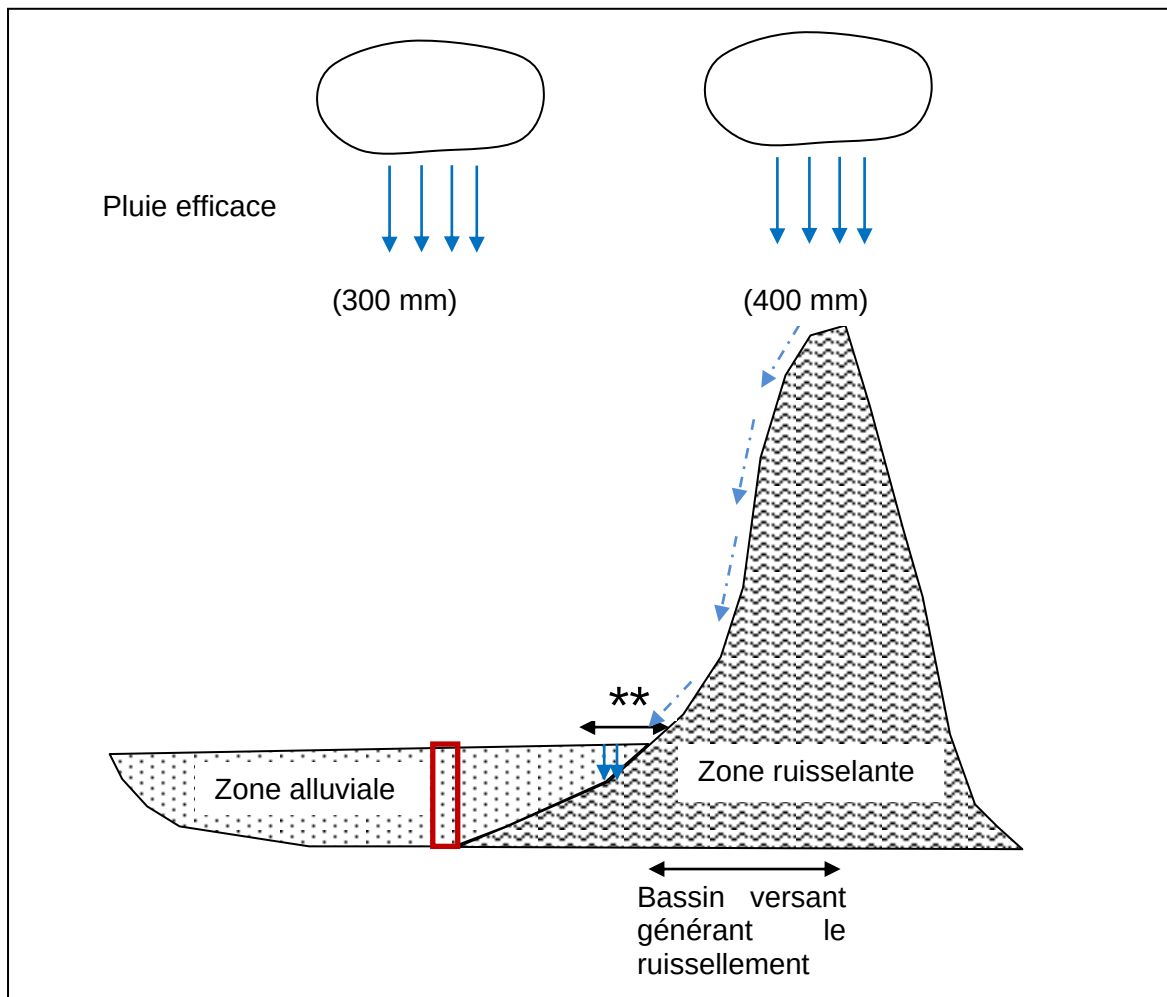


Illustration 20 – Coupe verticale schématique d'un cas d'alimentation par ruissellement d'une nappe alluviale sollicitée par un captage (en rouge)

** bande située en bordure de zone alluviale alimentée à la fois directement par la pluie efficace survenant dans la plaine (300 mm) et par ruissellement depuis le relief constitué de terrains favorisant le ruissellement (120 mm).

b) Sol, S (couverture pédologique et géologique)

Le critère S représente la partie supérieure de la couche du terrain qui contribue à la protection de la ressource vis-à-vis d'une infiltration diffuse ou accidentelle de pollution. Cette couche protectrice de surface est donc représentée, soit par la **couverture pédologique** (sol au sens strict), soit par les **formations superficielles**.

La nature et les caractéristiques physico-chimiques du sol sont intimement liées à sa genèse (altération de la roche) et son histoire (épisodes climatiques, colonisation végétale, exploitations agricoles...). Au contraire d'un sol mince, un sol épais pourra contribuer à la protection de l'aquifère vis-à-vis de l'infiltration des eaux de surface.

Le pouvoir protecteur du sol est fonction de sa perméabilité, et de sa capacité à stocker l'eau et les fluides polluants créant ainsi un effet retard à l'infiltration ou de diffusion dans l'espace et/ou le temps, et la dégradation potentielle du contaminant. Les notions de vitesse d'infiltration ou de perméabilité (K) et de capacité de stockage (CS) en eau du sol sont des notions permettant de qualifier le pouvoir protecteur des sols. Ces notions dépendent d'une part de l'épaisseur du sol et d'autre part de la texture et de la structure de ce dernier, auxquelles il faut rajouter la teneur en éléments grossiers.

D'autres paramètres tels que la battance et l'hydromorphie jouent un rôle dans le fonctionnement hydrique des sols et le partitionnement des eaux entre les écoulements vers les eaux de surface et l'infiltration vers les eaux souterraines. Ces paramètres n'ont pas été pris en compte en raison de la difficulté de les quantifier. Il existe néanmoins des règles de pédotransferts permettant d'estimer la sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance. A noter que la battance et l'hydromorphie sont prises en compte pour déterminer la vulnérabilité de l'aire d'alimentation d'un captage d'eau de surface (Le Henaff, 2012).

Au final, nous avons retenu une approche simplifiée, avec trois classes de textures: dominante d'argiles, dominante de limons, dominante de sables. De la même façon trois classes de pierrosité ont été identifiées : 0-30% de cailloux, 15-60% de cailloux et > 60% de cailloux. Ces deux paramètres ont été croisés pour déterminer la nature du sol (Illustration 21) qui est ensuite croisée avec l'épaisseur des sols (Illustration 22).

Le renseignement de ce critère S repose sur l'analyse de plusieurs documents (cartes pédologiques, base de données d'occupation des sols, schémas d'assainissement, photos aériennes...) et sur la vérification de la nature et de l'épaisseur du sol sur le terrain par des sondages à la tarière.

		TEXTURE		
		Argile A > 12 %	Limons A < 12 % et S < 60 %	Sable S >= 60 %*
CAILLOUX	0-15 %	1	1	2
	30-60 %	1	2	3
	> 60 %**	2	3	4

Illustration 21 : Tableau de détermination de la nature d'un sol en fonction de sa texture et sa proportion de cailloux.* : définition des Arénosols, ** : définition des Peyrosols.

S		NATURE DU SOL				
		Inconnue (Se)	1	2	3	4
Zones imperméabilisées		S0				
EPAISSEUR	> 5m	S1	S1	S1	S2	S3
	1-5m	S1	S1	S2	S3	S3
	60-100cm	S2	S2	S3	S4	S4
	30-60cm	S3	S3	S4	S4	S4
	0-30cm	S4	S4	S4	S4	S4

Illustration 22 : Indexation du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur

En l'absence de données pédologiques relatives à la nature des sols, une approche simplifiée est adoptée en ne considérant que l'épaisseur et en effectuant un diagnostic sur la pierrosité. Dans ce cas de figure, S défini à partir de l'épaisseur **Se** peut être modifié en fonction de la pierrosité en **Sep** de la manière suivante (Illustration 23) :

PIERROSITE	%	Sep
peu caillouteux	0-30	Se
caillouteux	40-60	Se+1
très caillouteux	>60	Se+2

Illustration 23 : Tableau de détermination des classes du critère S à partir uniquement des classes d'épaisseur et de la pierrosité

Le cas d'un aquifère superposé, est généralement pris en compte dans le critère S. Dans ce cas, on lui attribue un indice plus ou moins protecteur selon les possibilités de drainance verticale descendante vers l'aquifère sous-jacent dont on cartographie la vulnérabilité.

Enfin les surfaces imperméabilisées (ex. : zones urbanisées) peuvent être caractérisées comme très protectrices et classées en S0, en fonction de l'occupation du sol de l'aire d'alimentation, mais sans oublier d'évaluer les zones adjacentes pouvant être des zones réceptrices d'eau de ruissellement.

A minima, il est particulièrement nécessaire d'identifier et de localiser les zones d'hétérogénéités des sols présentant un faible pouvoir retardant, c'est-à-dire présentant au moins l'un des critères suivant : épaisseur inférieure à 30 cm, au moins 60 % de sables, plus de 60 % d'éléments grossiers.

c) Capacité d'infiltration, I

Ce paramètre vise à représenter l'impact, dans la partition des pluies efficaces, des formations géologiques présentes dans la zone non saturée, exception faite des aspects liés à la couverture pédologique. Par exemple, un sol perméable peut reposer sur une formation géologique imperméable : l'absence d'une protection de la nappe assurée par le sol peut être contrebalancée par une protection assurée par la nature de la zone non saturée (ZNS). C'est donc l'effet de la zone non saturée que l'on cherche à estimer au travers de ce paramètre.

L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR⁷) permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité intrinsèque des formations géologiques présentes en surface ou sub-surface à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie. L'indice est constitué par comparaison du réseau hydrographique existant avec un réseau hydrographique reconstitué à partir des pentes. Il inclut donc l'impact de la topographie dans la partition de la pluie efficace.

L'IDPR, disponible en France sous forme de grille, est à utiliser sous une forme polygonale, par unité fonctionnelle. A cet effet, on pourra utiliser les polygones de la carte géologique

⁷ http://www.esrifrance.fr/iso_album/p30_brgm.pdf

harmonisée au 1 / 50 000. Pour chacune des formations géologiques, une valeur médiane de l'IDPR sera calculée : cette valeur sera utilisée pour caractériser le paramètre. L'IDPR est accessible via le site INFOTERRE du BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/>).

L'intérêt de l'IDPR est qu'il existe sur l'ensemble de la France et qu'il permet de mettre en évidence des variations spatiales. Il reste que l'échelle de validité des cartes est le 1/100 000, au mieux le 1/50 000⁸ ; cette méthode n'est donc valable que pour des grands bassins d'alimentation (plusieurs dizaines de km²) et plutôt adapté à des milieux continus, hors aquifères alluviaux.

Dans le cas de petits bassins et des aquifères alluviaux, deux approches doivent être privilégiées : (1) on considère que les variations spatiales de l'infiltration sont peu importantes et dans ce cas le critère « **infiltration** » n'est pas pris en compte dans la cartographie de la vulnérabilité ; (2) on considère que les variations spatiales de l'infiltration doivent être prises en compte et dans ce cas il faut découper le bassin d'alimentation en cellules d'infiltration homogène, puis estimer l'infiltration de chaque cellule sur la base des caractéristiques propres de la cellule concernée (Bussard, 2005). La mesure in-situ de l'infiltration nécessitant un important dispositif de surveillance (cases lysimétriques) et demandant une longue période de mesure pour l'obtention de valeurs annuelles moyennes, il est difficilement envisageable de calculer l'infiltration annuelle moyenne par ce biais.⁹

⁸ L'IDPR est calculé à partir de deux sources de données : le MNT et la BD CARTHAGE de l'IGN. Si le MNT est relativement précis (maille de 25 ou 50 m), l'échelle de référence de la BD CARTHAGE est le 1/50 000.

⁹ Pour mémoire, un bilan hydrique conduirait à l'estimer de la façon suivante :

$$I_i = P_{bi} - R_i - ETR_i \text{ [m/s]}$$

I_i : Infiltration moyenne sur la cellule i

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].

À défaut de ces éléments, Il est envisageable de relativiser la capacité d'infiltration d'une AAC en raisonnant sur la nature lithologique de la ZNS – de façon similaire à l'approche proposée dans la méthode DRASTIC. On veillera à i) bien caractériser la nature lithologique des formations géologiques et non celle du sol (au sens pédologique), déjà caractérisé par le paramètre S et ii) se méfier des « faux amis » en se basant sur la simple dénomination des formations. Une formation de marnes et caillasses peut ainsi présenter une fissuration importante, rendant la perméabilité verticale élevée et la protection de l'aquifère faible.

Un cas particulier méritant d'être mentionné est celui de la formation des « argiles à silex », souvent rencontrée par exemple en recouvrement de l'aquifère crayeux du Séno-Turonien. Cette formation est fortement hétérogène, comme en témoignent les nombreux sondages qui l'ont traversée et les différents travaux qui lui ont été consacrés (Quesnel, 1997). Selon les secteurs, elle peut prendre la forme d'une argile plastique très peu perméable, de poches de sables bien classés ou encore de lits composés à 80% de silex. Son rôle dans l'infiltration vers la nappe est donc très variable d'un secteur à un autre.

d) Epaisseur de la zone non saturée, H, exprimée en mètres

Cet indice complète l'impact de la nature des sols et des formations géologiques présentes dans la zone non saturée, en fournissant une information relative des temps de transit dans la ZNS. Ainsi, à perméabilité verticale du sol et de la ZNS équivalente, une épaisseur importante de ZNS induira une meilleure protection qu'une faible épaisseur.

Dans un milieu continu ou assimilé continu, la vulnérabilité de l'aquifère diminue donc avec la profondeur à laquelle il se trouve. L'épaisseur de la zone non saturée est calculée comme étant la distance entre la surface du sol et le niveau de la nappe pour un aquifère libre. Dans un aquifère captif, c'est la distance entre la surface du sol et le toit de l'aquifère qui est à considérer. Ceci étant, ce cas ne devrait pas être rencontré dans la mesure où une telle situation est une condition d'exclusion de la zone délimitée par l'AAC.

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

e) Perméabilité de l'aquifère, K, exprimée en m/s

Ce paramètre K est pris en compte pour caractériser les écoulements horizontaux ou sub-horizontaux dans l'aquifère. Il est intégré dans la mesure où l'enjeu considéré est la qualité de l'eau pompée au niveau de l'ouvrage. De fait, cela suppose un écoulement dans l'aquifère (on ne s'intéresse donc pas uniquement à la capacité d'un polluant à atteindre la ressource).

En l'absence de valeurs de perméabilité disponibles sur la zone d'étude, celles-ci pourront être évaluées à partir de gammes théoriques proposées dans des ouvrages généralistes d'hydrogéologie. L'objectif consiste avant tout à mettre en évidence des zones plus perméables que d'autres : on est donc essentiellement sur une approche relative. Les valeurs de perméabilité à privilégier sont celles que l'on peut déduire de l'interprétation des pompages d'essais. Les perméabilités issues d'un modèle hydrodynamique sont à manier avec précaution car elles correspondent souvent avant tout à un paramètre de calage du modèle.

5.3.3 Détermination des classes de chaque paramètre

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

La classification des paramètres est présentée dans le tableau ci-dessous.

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

Illustration 24 - Calcul de l'indice d'un paramètre à partir de ses valeurs (milieu continu)

Dans le cas où l'infiltration ne peut être déterminée au moyen de l'IDPR, les classes de valeurs seront déterminées au cas par cas.

Dans le cas où la carte piézométrique disponible correspond à une situation de basses eaux, on pourra s'appuyer sur des chroniques piézométriques acquises dans la zone d'étude pour ajuster les classes de valeurs proposées dans l'illustration 24. Ceci a été effectué dans le cadre d'une étude réalisée dans le secteur de Dreux (aquifère de la craie) où une carte de basses eaux a été utilisée (Vernoux et al., 2010). Les bornes des valeurs des classes ont été ajustées comme présenté en Illustration 25 Les modifications apportées, mineures dans le cas présent, peuvent s'avérer plus importante dans le cas de battements de nappe importants (plus de 20 m par exemple) et d'une carte piézométrique de très basses eaux.

Valeur de l'indice	Epaisseur Zone Non Saturée (H, m)
4	< 2
3	2 à 6
2	6 à 22
1	22 à 53
0	>53

Illustration 25 - Adaptation des classes de valeurs du paramètre H dans le cas d'une carte piézométrique présentant une situation de basses eaux

5.3.4 Poids des paramètres et classes de vulnérabilité

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

Paramètre	Abrév.	Poids
Pluie efficace	P	0.10
Sol	S	0.25
Infiltration ZNS (IDPR ou autres paramètres)	I	0.30
Epaisseur ZNS	H	0.20
Perméabilité de l'aquifère	K	0.15
Total		1.00

Illustration 26 - Poids des paramètres pris en compte pour caractériser la vulnérabilité en milieu continu

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

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

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

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

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

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

Par exemple (cf. 5.3.6), dans le cas d'une AAC comportant i) une zone alluviale dans laquelle l'IDPR ne peut être utilisé et ii) des secteurs pour lesquels aucune information pédologique n'est disponible, la somme pondérée proposée ci-dessus sera appliquée sur l'ensemble du territoire en dehors :

- des zones alluviales pour lesquelles le poids du paramètre IDPR devient nul. Le poids des autres paramètres est réajusté de façon proportionnelle afin que la somme des poids soit égale à 1. Dans ces zones, l'équation devient donc :

$$\text{Vulnérabilité(ZA)} = 0,14 P + 0,36 S + 0,29 H + 0,21 K$$

- des secteurs non cartographiés lors de l'étude pédologique pour lesquels le poids du paramètre sol devient nul. De façon similaire au cas de l'IDPR, le poids des autres paramètres est réajusté de façon proportionnelle afin que la somme des poids soit égale à 1. Dans ces zones, l'équation devient donc :

$$\text{Vulnérabilité(Zsol)} = 0,13 P + 0,40 \text{ IDPR} + 0,27 H + 0,20 K$$

Pour les secteurs cumulant les problématiques IDPR et sol, l'équation devient :

$$\text{Vulnérabilité(ZAsol)} = 0,22 P + 0,45 H + 0,33 K$$

En tout état de cause, ces ajustements de la somme pondérée utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité ne sont pas à considérer comme une fin en soi : en zone alluviale, on pourrait préférer qualifier la capacité d'infiltration des formations géologiques alluviales à partir de leur lithologie (alluvions argileuses, sableuses, graveleuses,...), plutôt que de supprimer abruptement le paramètre dans l'évaluation de la vulnérabilité.

5.3.5 Zone contributive à l'AAC par ruissellement

Une zone contribuant à l'alimentation de l'AAC par ruissellement vers la zone d'infiltration ne peut en aucun cas être traitée par la méthode proposée précédemment. En effet, c'est sur la base des secteurs les plus pentus ou les plus cumulatifs en termes de flux qu'il convient de raisonner. Pour ces cas, il est donc indispensable de distinguer deux zones différentes au sein de l'AAC.

5.3.6 Exemple d'application

L'Aire d'Alimentation du champ captant de Vert-en-Drouais (Vernoux et al., 2010) ne comporte pas de zone contributive par ruissellement. Par ailleurs, l'aquifère capté est celui de la craie sénonienne, sous recouvrement de formations alluviales perméables. En l'absence de karstification active identifiée sur ce secteur et au vu du comportement hydrodynamique observé sur les chroniques de débit et de niveau piézométrique, cet aquifère est assimilé à un milieu continu. La méthode proposée ci-avant est donc appliquée.

La pluie efficace a été évaluée comme étant comprise entre 100 et 200 mm sur l'AAC*, sans pouvoir distinguer une variabilité spatiale. Le paramètre P est donc constant sur toute l'AAC* et sa valeur vaut 2.

Une carte pédologique élaborée spécifiquement sur l'AAC* permet de caractériser le rôle des sols à une échelle adaptée. Des zones n'ont cependant pas pu être cartographiées et des lacunes d'information demeurent donc. Sur ces secteurs, la vulnérabilité sera calculée sans prendre en compte le paramètre sol, selon la règle de calcul proposée ci-avant (cf. « Vulnérabilité(Zsol) »).

L'IDPR est disponible sur toute l'AAC* mais non utilisable en zone alluviale. Sur ce secteur, la règle de calcul de la vulnérabilité sera donc adaptée (cf. « Vulnérabilité(ZA) »). Dans le cas où l'information relative au sol serait également manquante, on utilisera la règle de calcul « Vulnérabilité(ZAsol) ».

L'épaisseur de la Zone Non Saturée est connue au travers d'une carte piézométrique dressée en situation de basses eaux en octobre 2009. Ces niveaux particulièrement bas conduisant à surestimer le degré de protection offert par cette épaisseur, les seuils utilisés pour la définition des classes de valeurs de l'indice sont révisées.

Enfin, le paramètre K (perméabilité de l'aquifère) est évalué en se basant dans un premier temps sur une approche géomorphologique : la perméabilité va en décroissant des vallées humides aux vallées sèches puis aux plateaux. Cette hiérarchisation est complétée par l'interprétation de pompages d'essais réalisés en vallée humide : des valeurs de perméabilité supérieures à 10^{-3} m/s donnent une valeur de 4 pour l'indice en vallée humide. En appliquant le principe d'une décroissance de la perméabilité selon la géomorphologie, des valeurs de 3 et 2 sont adoptées respectivement pour les vallées sèches et les plateaux.

Les cartes élaborées pour les différents paramètres (hors pluie efficace dont la valeur est constante) figurent en Illustration 27. La carte de vulnérabilité élaborée figure en Illustration 28.

Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses - Version révisée du guide méthodologique

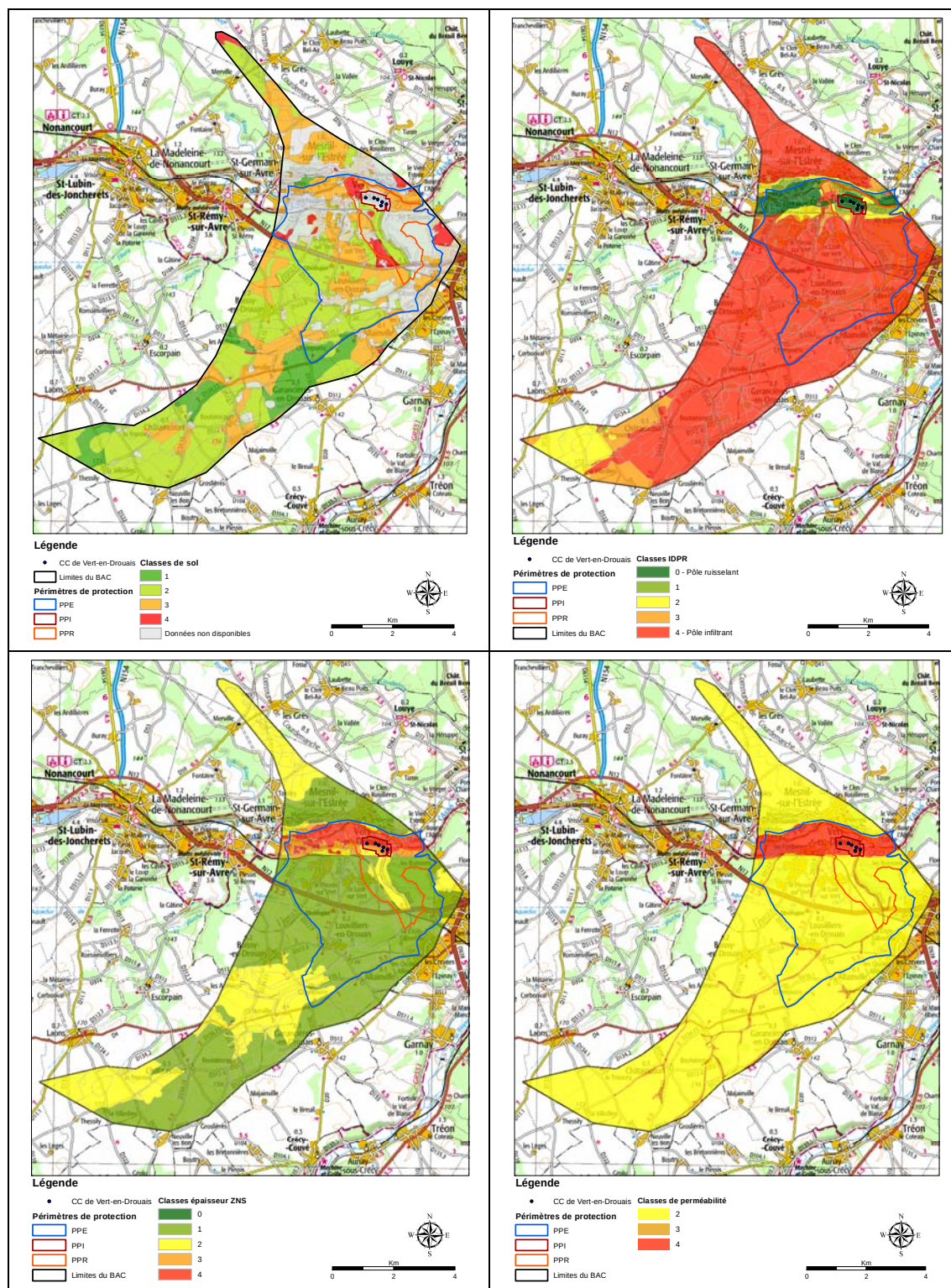


Illustration 27 – Cartes des paramètres pris en compte pour la détermination de la vulnérabilité sur l'AAC* du champ captant de Vert-en-Drouais

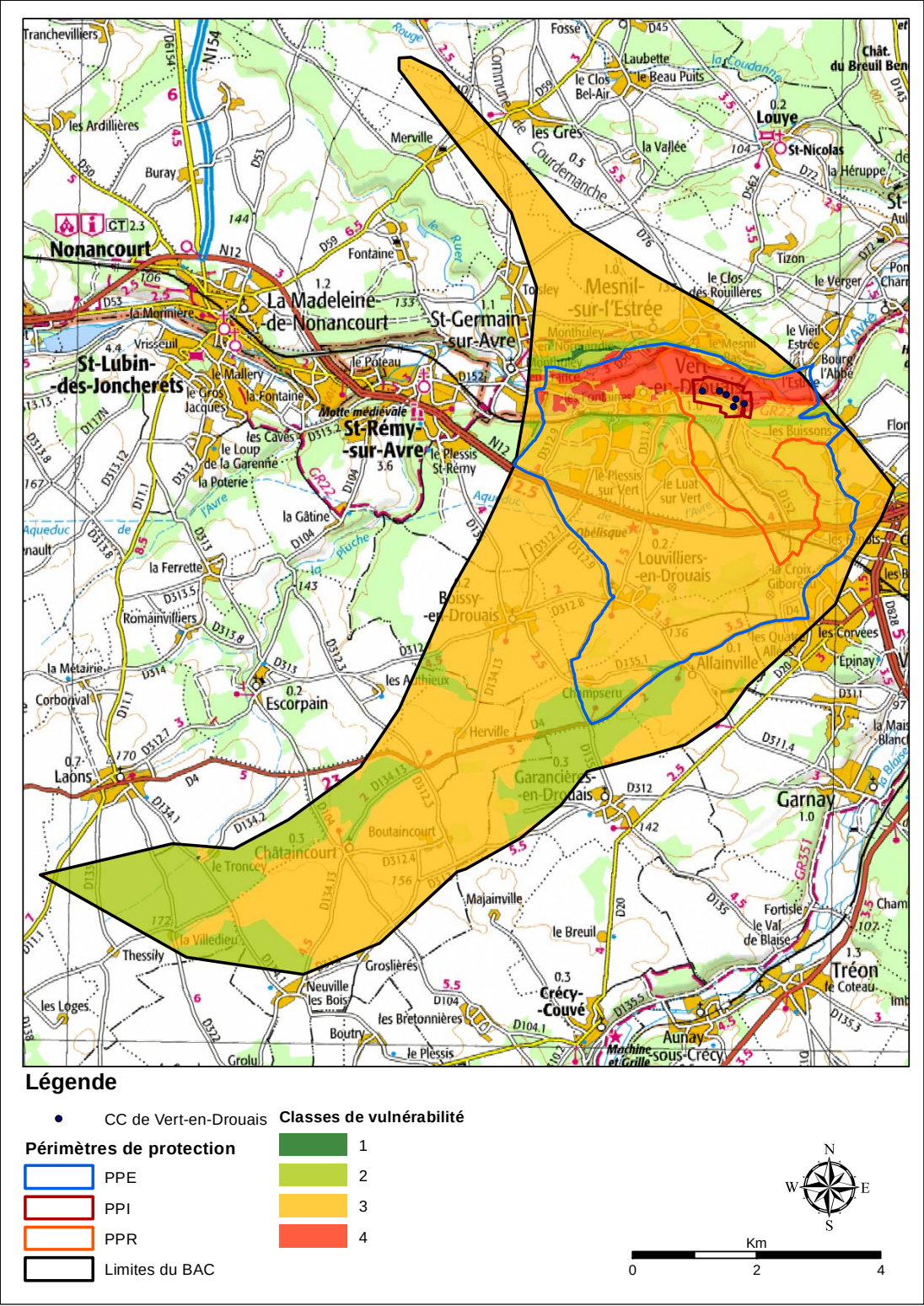


Illustration 28 – Cartographie de la vulnérabilité de l'AAC* du champ captant de Vert-en-Drouais

5.4 IDENTIFICATION DE ZONES CONTRIBUTIVES

La carte de vulnérabilité permet de cibler des zones prioritaires pour mettre en place un plan d'action de lutte contre les pollutions. Son principal avantage est de pouvoir être réalisée relativement facilement à partir des données issues de l'étude hydrogéologique et pédologique. Elle représente aussi un bon outil de communication entre les hydrogéologues et les gestionnaires de captages. Sa faiblesse est de simplifier des conditions géologiques et des processus hydrologiques naturellement complexes et de ne pas pouvoir être validée (Foster et al., 2013).

Pour cibler les zones prioritaires, une autre approche peut être envisagée, basée sur une identification des zones qui contribuent majoritairement à l'alimentation en eau d'un captage. Cette approche plus complexe à mettre en œuvre et nécessitant un modèle hydrodynamique spatialisé est à privilégier pour de grandes AAC d'aquifère continu.

L'idée, développée par Bussard (2005), a été reprise dans le cadre d'une thèse soutenue en novembre 2013 par Sandra Bellier : « Modélisation de la contamination nitrique de la nappe des calcaires de Champigny. Application à la protection des captages prioritaires de la fosse de Melun et de la basse vallée de l'Yerres ». La méthodologie proposée dans le cadre de ce travail est présentée ci-après.

« La localisation et la quantification de la contribution d'une zone à un captage peuvent être déterminées grâce à la modélisation du transport d'un soluté conservatif. La contribution d'une zone à un captage est déterminée en deux étapes (Illustration 29) :

1. on impose une concentration donnée en un traceur parfait à l'ensemble des flux d'eau entrants dans le système modélisé et on détermine grâce à un calcul en écoulement permanent moyen, le flux global de matière récupéré au captage nommé F_{ptot} .
2. on impose une concentration donnée en un traceur parfait sur une surface élémentaire à l'ensemble des flux d'eau entrants. On détermine ensuite en écoulement permanent moyen, le flux de matière récupéré au captage et nommé F_{pzone} .

La part contributive de la zone est obtenue par le ratio entre le flux de matière contributif de la zone considérée (F_{pzone}) et le flux global de matière récupéré au captage (F_{ptot}).

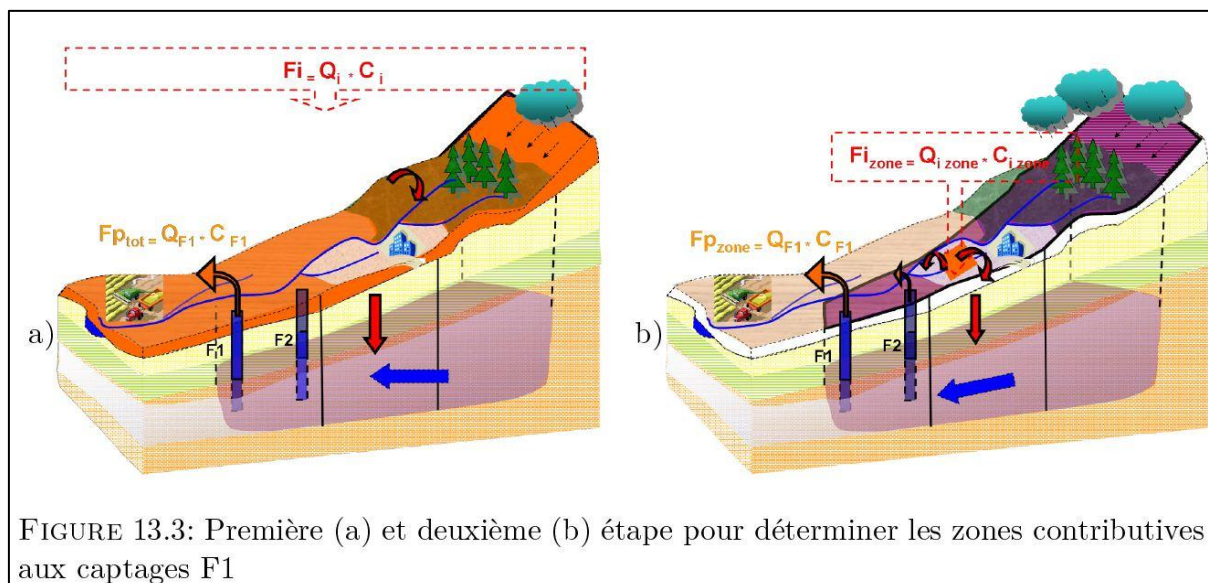


Illustration 29 - Méthode de détermination des zones contributives associées à un captage d'eau potable (Bellier, 2013)

S'il y a conservation de la masse, le calcul des zones contributives doit vérifier l'équation suivante à conditions que l'ensemble de ces zones couvrent toute la superficie d'alimentation des captages :

$$\sum_{i=1}^{i=N_{zone}} Fp_{zone} = Fp_{tot}$$

avec Nzone le nombre total de zones contribuant aux captages.

L'ensemble des zones contributives nous permet de délimiter une surface que nous pourrions ensuite comparer avec celle prédéfinie au préalable. En principe toutes les zones contributives doivent se situer à l'intérieur de l'AAC mais la somme des zones contributives à un captage ne sera pas similaire à la superficie de son aire d'alimentation. »

La conservation de la masse correspondant à une hypothèse de la modélisation du transport de soluté, l'équation figurant ci-avant doit être vérifiée : elle permet en particulier de s'assurer que l'ensemble des zones contribuant à l'alimentation du captage a bien été identifié. L'illustration 30 fournit un exemple d'enveloppes de contributions pour les captages de la fosse de Melun. Les enveloppes représentent respectivement 50, 70 et 90% de la surface contributive.

Notons que cette approche suppose notamment :

- l'existence d'un modèle hydrodynamique spatialisé et utilisable pour le transport de solutés ;
- une confiance raisonnable dans la capacité du modèle à rendre compte des écoulements dans la zone d'alimentation du captage, ce qui passe par une phase de calage du modèle hydrodynamique.

Enfin, on ne devra en aucun cas confondre contribution de zones au débit pompé par un captage et débits transitant dans les mailles d'un modèle. L'existence d'un débit transitant dans une maille ne préjuge en rien de la capacité de celle-ci à contribuer à l'alimentation du captage : ce qu'il convient de connaître c'est l'origine de l'eau et si celle-ci termine bien sa course au niveau du captage. Dans le cas d'une maille située au voisinage d'une rivière, le débit transitant dans la nappe pourrait ainsi être élevé alors que l'essentiel de l'eau termine sa course dans la rivière.

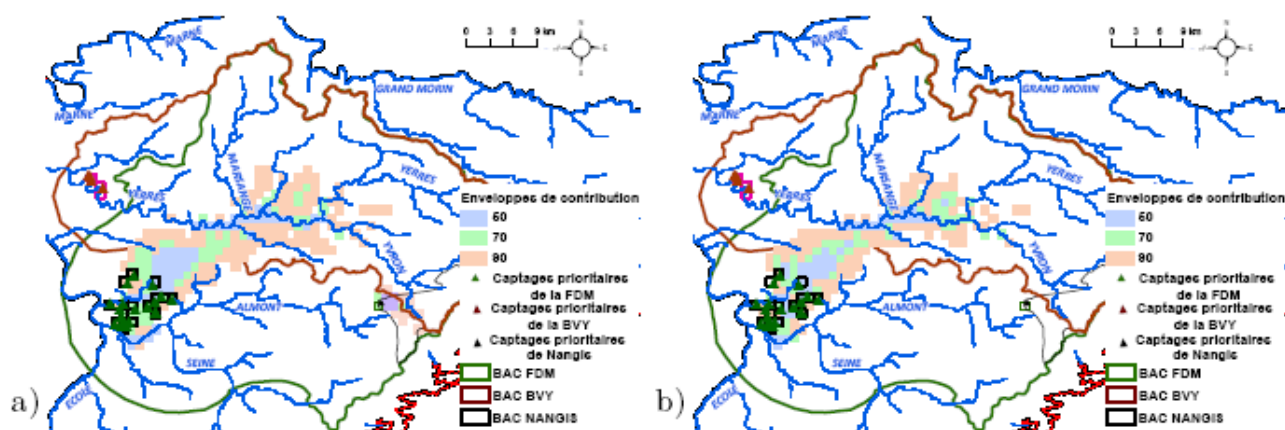


Illustration 30 - Enveloppes de contribution aux captages de la Fosse de Melun pour une période de faible recharge (a) et de forte recharge (b) (Bellier, 2013)

6 Cas d'un système aquifère discontinu karstique

6.1 ETUDE ET CARACTERISATION DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE

Les questions préliminaires à toute étude de vulnérabilité d'un aquifère karstique sont les suivantes :

1. Le réservoir principal est-il bien dans des formations rocheuses solubles (calcaire, craie, dolomie, gypse...) pouvant être karstifiées ?
2. Est-ce que la structure de l'aquifère et le fonctionnement hydrodynamique est de type aquifère karstique fonctionnel (cf. paragraphe 4.1.2) ?
3. Quelle est la nature du captage (source, source pompée, forage sur drain, forage dans le milieu fissuré) ?
4. Quelle est le débit du captage ?
5. Est-ce que l'aquifère karstique est unaire ou binaire (cf. paragraphe 4.1.2) ?
6. La protection naturelle de l'aquifère capté a-t-elle été modifiée par l'homme (ré-infiltration des eaux de ruissellement, puisards, décapage des sols, etc.) ?
7. Existe-t-il d'autres exutoires à proximité du système karstique étudié ?

Une réponse négative à l'une des deux premières questions va orienter l'étude vers une approche de la vulnérabilité utilisée pour les aquifères continus (chapitre 5) ou fissurés (§ 7.1). Les réponses aux questions suivantes (3 à 7) vont conditionner le dimensionnement de l'étude de vulnérabilité : la nature du captage va déterminer la méthodologie à mettre en œuvre pour définir l'aire d'alimentation (§ 6.2) ; le débit du captage donnera des informations précieuses sur la taille de l'AAC et donc sur la complexité des études à mettre en œuvre, la taille des aires à protéger, le coût de l'étude ; la présence de pertes (karst binaire) informera sur les points sensibles de la vulnérabilité du système et la nécessité de bien prendre en compte les bassins versants alimentant les pertes dans la cartographie de vulnérabilité ; les modifications anthropiques devront également être prises en compte lors de l'évaluation de la vulnérabilité ; finalement il ne faut pas négliger les informations hydrogéologiques concernant les secteurs contigus au système karstique étudié : la complexité du karst fait que des connexions hydrauliques peuvent exister entre deux systèmes contigus de manière permanente ou temporaire en fonction des charges hydrauliques. Cela signifie que de tels systèmes partagent en partie une même aire d'alimentation au moins sous certaines conditions hydrologiques. Il faut aussi ne pas sous-estimer la taille des AAC, des distances d'écoulement sur plusieurs dizaines de kilomètres démontrées par essais de traçage ne sont pas rares. Le débit annuel moyen écoulé au captage peut être un paramètre particulièrement difficile à estimer avec la précision requise car fréquemment des sources temporaires ou des sous-écoulements vers d'autres systèmes peuvent contribuer à une sous-estimation significative du débit.

Ces questions ne pourront être adressées que par le biais d'une étude hydrogéologique préliminaire visant à identifier la nature de l'aquifère puis à caractériser son fonctionnement hydrodynamique. Cette étude s'appuiera sur une synthèse des données hydrogéologiques existantes (thèses, rapports d'étude, bibliographie spéléologique, cartes topographiques et géologiques, consultation des bases de données nationales BSS & BD cavités (cf. chapitre 10), chroniques de piézométrie, de débit de source et de données physico-chimiques, essais de traçage) ; des reconnaissances de terrain pourront également être nécessaires si possible en période de crue pour observer les conditions d'infiltration (pertes) et la présence de sources de débordement par exemple. Dans le cas de systèmes karstiques mal documentés, il pourra s'avérer nécessaire de réaliser des travaux : instrumentation du captage avec capteurs de pression et acquisition de paramètres physico-chimiques, essais de pompage, essais de traçage, échantillonnages chimiques, etc.

6.2 DELIMITATION DES AIRES D'ALIMENTATION DE CAPTAGES (AAC)

Deux types d'aire d'alimentation de captages (source, forage) en contexte karstique doivent ainsi être distingués en fonction du type de systèmes karstiques (Illustration 10) :

- (i) Les **systèmes karstiques unaires** pour lesquels l'aire d'alimentation est endogène, c'est-à-dire constituée uniquement par les formations carbonatées affleurantes. Dans ce cas, l'AAC est constituée uniquement de terrains karstifiables.
- (ii) Les **systèmes karstiques binaires** pour lesquels l'aire d'alimentation est mixte (endogène et exogène), c'est-à-dire constituée de terrains carbonatés karstifiés et de terrains non karstifiables en amont de terrains karstifiables. Dans ce cas, une partie de l'AAC est constituée de terrains non karstifiables qui concentrent l'infiltration des eaux en un point précis (au niveau d'une perte), l'autre partie étant constituée par les terrains karstifiables.

La stratégie à mettre en œuvre pour déterminer les AAC sera différente selon qu'il s'agit d'étudier un système karstique unaire ou binaire et également en fonction de la nature du captage (source ou forage).

6.2.1 Systèmes karstiques unaires

6.2.1.1 Cas d'une source

Les résultats de la caractérisation géologique constituent la base de la délimitation de l'AAC : une reconstitution de la topographie du mur de l'aquifère par le biais de coupes géologiques sériées peut par exemple permettre de tracer les lignes d'écoulement et déterminer les secteurs ou les écoulements divergent vers d'autres exutoires. De même, le rôle des failles majeures peut être étudié afin de déterminer si elles constituent une limite du système (barrière étanche) ou au contraire un drain. Le bilan hydrologique (cf. paragraphe 6.2.3), lorsqu'il peut être évalué, permet dès le début des investigations de caler la taille approximative de l'AAC. Une ou plusieurs campagnes de multi-traçages de reconnaissance peuvent s'avérer utiles, voire indispensables, pour affiner les limites. Les points d'injection peuvent être des points naturels d'infiltration (pertes, gouffres, grottes) ou des points artificiels (forages, grattages tractopelle...). Il est utile de procéder à des traçages en conditions hydrologiques contrastées (crue et étiage) afin de bien évaluer la variabilité des vitesses d'écoulement et les processus de diffusions vers d'autres systèmes.

Un suivi hydrologique de la source sur au moins un cycle hydrologique et une analyse des débits selon la méthode statistique des débits classés est recommandé. Cette analyse permet de mettre en évidence l'existence d'une alimentation retardée ou le débordement d'une partie du débit vers un autre système ou des sources temporaires (Marsaud 1997).

6.2.1.2 Cas d'un forage

Si le forage est positionné sur un conduit karstique qui alimente une source en aval, il s'agit de délimiter l'aire d'alimentation de la source en aval comme décrit dans le paragraphe précédent.

Dans le cas d'un forage situé dans le milieu fissuré à l'écart des conduits (captage de type 3, Illustration 9), la détermination de l'AAC est plus complexe : elle peut être approchée grâce à des données piézométriques, s'il existe des piézomètres ou des regards sur la zone noyée (gouffre, grottes, trop-plein...). Dans certains cas, et lorsque les épaisseurs de zones non-saturées ne sont pas trop importantes, la réalisation de quelques piézomètres peut s'avérer nécessaire (Muet & Vier 2011).

Une seconde approche est la réalisation d'essais de traçage. Ces traçages nécessitent un pompage en régime permanent sur l'ouvrage jusqu'à la fin de la restitution. Les points d'injection peuvent être des points naturels d'infiltration (pertes, gouffres, grottes...) ou des points artificiels (forages, grattages tractopelle, etc.) (Muet & Vier 2011).

6.2.2 Systèmes karstiques binaires

Pour le cas des systèmes binaires, la partie endogène (infiltration diffuse dans les calcaires) est évaluée selon l'approche décrite au paragraphe 6.2.1 et pour la partie exogène (bassins-versants en amont des pertes) 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.

Il convient d'indiquer que lorsqu'il s'agit de pertes partielles le long d'un cours d'eau, l'identification de ces pertes peut ne pas être triviale. Si de tels cours d'eau traversent des secteurs en roche soluble tout en étant perché par rapport au niveau de base connu, il est judicieux de suspecter l'existence de pertes. Leur évaluation se fera par le biais de jaugeages différentiels le long du cours d'eau et ce, en différentes conditions hydrologiques.

Dans le cas où les pertes sont situées dans le lit de rivières drainant des bassins versants étendus, l'approche proposée ici peut ne plus être applicable. Il s'agit alors d'une problématique de préservation du bon état des cours d'eau (hydrologie de surface). Un cas emblématique étant l'aquifère karstique du val d'Orléans alimenté en partie par des pertes en Loire.

6.2.3 Calcul du bilan hydrologique

Le **calcul du bilan hydrologique** permet une vérification de la surface de l'aire délimitée par les méthodes précédentes et/ou fournit des éléments pour mieux cibler sa délimitation. Il est basé sur la résolution de l'équation $P = I + R + ETR + \Delta R$ (P : précipitations ; I : Infiltration ; R : Ruissellement ; ETR : évapotranspiration réelle ; ΔR = variations des réserves en eau). Il ne s'applique qu'au cas où les exutoires du système peuvent être quantifiés : captages de source ou cas particulier de forage localisé sur un conduit karstique en amont d'une source, auquel cas les débits de sortie doivent correspondre à la somme du débit prélevé par forage et du débit de la source.

L'étude du bilan hydrologique repose sur l'analyse de la cohérence qui existe entre les flux d'entrée et les flux de sortie à l'exutoire d'un système. La méthode consiste à évaluer pour une période donnée, le volume d'eau écoulé à l'exutoire ($V = \text{débit de la source} \times \text{durée de la période}$) et le volume des pluies efficaces qui renouvelle les réserves et entretient l'écoulement dans le système. Du fait des variations de débit de l'exutoire au cours du temps, la période considérée doit permettre de représenter un état moyen du système, sinon, la quantité stockée ou destockée par le système (ΔR) fausse l'équilibre des flux entrants et sortants. Les pluies efficaces, au sens hydrologique, représentent la quantité d'eau fournie par les précipitations qui reste disponible pour le système, après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle (ETR). Une partie de ces pluies efficace alimente les écoulements de surface par ruissellement. Le coefficient de ruissellement peut être extrêmement variable à l'échelle d'une aire d'alimentation; le ruissellement peut être concentré et participer à l'alimentation du système karstique ou au contraire ne pas contribuer à l'écoulement de l'exutoire. Il est laissé à l'expertise de l'hydrogéologue d'apprécier la prise en compte ou non du ruissellement dans l'établissement du bilan hydrologique.

Les pluies efficaces sont déterminées généralement au pas de temps journalier (plus précis) ou mensuel selon la formule suivante : $P_{\text{eff}} = P - \text{ETR}$. C'est une approche agronomique qui tient compte de la quantité d'eau stockée ou consommée par le sol et la végétation.

L'estimation de l'ETR peut s'avérer délicate puisqu'il faut connaître les paramètres climatiques de la zone d'étude et les paramètres de sol. Les paramètres climatiques servent à déterminer l'évapotranspiration potentielle (on peut utiliser les formules de Turc, Penman, Penman-Montheith ou acquérir ce paramètre auprès des services météorologiques lorsqu'il existe). Le paramètre du sol pris en compte dans le calcul des pluies efficaces est la réserve utile, dont la valeur maximale correspond à la capacité maximale de rétention en eau du sol (valeur généralement comprise entre 20 et 200 mm). Lorsque cette réserve utile maximale n'est pas atteinte, en théorie, les précipitations ne génèrent pas de pluie efficace (le sol se gorge d'eau sans la restituer).

Les hydrologues ont une approche basée sur le déficit d'écoulement superficiel pour la détermination du bilan hydrologique. De fait, les volumes évapotranspirés ne rejoignent pas les cours d'eau. Une alternative couramment mise en œuvre consiste à calculer le déficit d'écoulement à partir de la formule de Turc, ce qui permet de limiter les paramètres climatiques à la température et aux précipitations.

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

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

où P représente les précipitations annuelles (mm) et T la température (°C) moyenne annuelle de l'air. La surface d'alimentation du système est alors déterminée en appliquant le rapport suivant : $S_{\text{alim}} = V / (P - D)$ où V représente le volume d'eau écoulé à l'exutoire, P la lame d'eau précipitée et D le déficit d'écoulement. Cette formulation est valide si le ruissellement hors du bassin est négligeable.

6.2.4 Autres méthodes

La superficie de l'AAC peut également être approchée à l'aide d'une modélisation selon des approches globales de type modèles (tels que proposés par les logiciels GARDENIA du BRGM, VENSIM, ou GR4). La superficie de l'aire d'alimentation est un des paramètres de calage du modèle (Thiery 2003, Perrin et al. 2003b, Fleury et al. 2007). Ce paramètre n'est représentatif que si les autres paramètres de calage sont bien connus ou cohérents. Dans le cas contraire, plusieurs jeux de paramètres pouvant aboutir à des calages équivalents, la valeur de la superficie obtenue par de tels modèles est à prendre avec précaution.

Les traceurs hydrogéochimiques peuvent également apporter des informations utiles pour la délimitation de l'AAC : dans le cas où des concentrations élevées en contaminants (nitrate, chlorures par exemple) sont détectés dans le captage, la source de ces contaminants devra être située à l'intérieur de l'AAC. Certains traceurs naturels ou de fortes dilutions des concentrations lors de crue pourront aussi servir d'indicateurs de l'existence de points d'infiltration concentrée dont la localisation devra être identifiée (Dörfliger 2010, Gilli et al. 2012).

Pour des AAC en région de montagne, les isotopes stables de l'eau (O^{18}/O^{16}) peuvent informer sur l'altitude des zones de recharge (Mudry 1987).

6.3 CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE

6.3.1 Introduction

Les phases préliminaires d'identification de la structure du système karstique, la caractérisation de son fonctionnement hydrodynamique, puis la délimitation de l'AAC sont des phases préliminaires indispensables dans le cadre d'une étude de vulnérabilité. Ces études préalables vont garantir que la bonne méthodologie de cartographie de la vulnérabilité est choisie (méthode PaPRIKa à privilégier pour les systèmes karstiques fonctionnels), que l'AAC est bien délimitée et que les contributions additionnelles par des bassins versants amonts ou des systèmes karstiques connexes sont bien identifiées. La bonne connaissance hydrogéologique qui découle de cette phase de caractérisation de l'aquifère va permettre une mise en œuvre de manière adéquate de l'approche multicritères de la vulnérabilité : bonne évaluation spatiale des critères, pondérations appropriées, modifications/adaptation de la méthode le cas échéant, etc. afin que la carte finale de vulnérabilité intrinsèque soit en accord avec le modèle conceptuel/la compréhension de l'aquifère. La carte de vulnérabilité finale doit être robuste et adaptée à la mise en application de mesures de protection par le gestionnaire du captage.

Si les moyens mis en œuvre ne permettent pas de caractériser suffisamment l'aquifère et d'évaluer les critères de vulnérabilité avec le détail requis, il est préférable de privilégier une approche plus classique (p.ex. délimitation de l'AAC et essais de traçage). En effet la cartographie inadéquate d'un critère peut aboutir à une carte de vulnérabilité finale difficile à défendre.

6.3.2 Méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques

Toutes les approches développées sont basées sur le croisement de la cartographie de plusieurs critères susceptibles d'influencer la vulnérabilité et la pondération de ces critères sur des bases empiriques pour aboutir à une carte finale de vulnérabilité intrinsèque à l'échelle de l'AAC.

La première méthode prenant en considération les propriétés spécifiques des aquifères karstiques est la méthode EPIK, développée en 1996 pour les aquifères karstiques suisses dans le but de délimiter des périmètres de protection à partir d'une carte de vulnérabilité (Dörfliger et al., 1999). La méthode prend en compte quatre critères : l'Épikarst (E), la couverture Protectrice (P), les conditions d'Infiltration (I) et le développement du réseau Karstique (K). La méthode RISKE a été développée en France, à partir de la méthode EPIK (Pételet-Giraud et al., 2000). Elle comprend cinq paramètres : nature de la Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification et Épikarst. La méthode RISKE a évolué vers RISKE 2 ou RISKE modifiée (Plagnes et al., 2006), où S et E sont deux critères englobés au sein du critère de protection P. E qualifie la présence ou non d'un épikarst pouvant constituer un aquifère temporaire de stockage en subsurface ; ses caractéristiques physiques et spatiales sont prises en compte. S correspond à l'estimation du rôle protecteur du sol vis-à-vis de l'infiltration. Ces méthodes ont d'abord été développées pour définir les Périmètres de Protection dans le cas de pollutions accidentelles

La méthode PaPRIKa¹⁰ a été développée sur la base des méthodes antérieures EPIK (Dörfliger et al. 1999), RISKE (Pételet-Giraud et al. 2000) et RISKE2 ou RISKE modifiée (Plagnes et al. 2006). Les différentes modifications ont porté sur la meilleure prise en compte de la zone non saturée et de ses caractéristiques, de l'existence ou non d'un horizon aquifère épikarstique pouvant contribuer à retarder le transfert d'une contamination, de la définition du critère de karstification ainsi que de la caractérisation des bassins versants des pertes.

En Europe, d'autres méthodes multicritères de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque ont été développées comme par exemple la méthode COP en Espagne ou la méthode PI en Allemagne. Une synthèse est présentée par Zwahlen (2004).

6.3.3 La méthode PaPRIKa

La méthode PaPRIKa est une méthode de cartographie de la vulnérabilité aussi bien de la ressource que du captage (source ou forage). Cette méthode combine quatre critères à savoir (Illustration 31) : le critère protection vis-à-vis de l'infiltration (**P**) qui est la combinaison des (sous-)critères E (épikarst), S (sol), et ZNS (zone non saturée), le critère nature de la roche du réservoir (**R**), le critère infiltration (**I**) et le critère karstification (**K**) (Dörfliger & Plagnes 2009, Dörfliger et al. 2009b).

Les critères sont regroupés en deux catégories : des critères associés à la structure de l'aquifère karstique (P et R) et des critères liés au fonctionnement hydrogéologique (I et K).

¹⁰ Protection des aquifères karstiques basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification

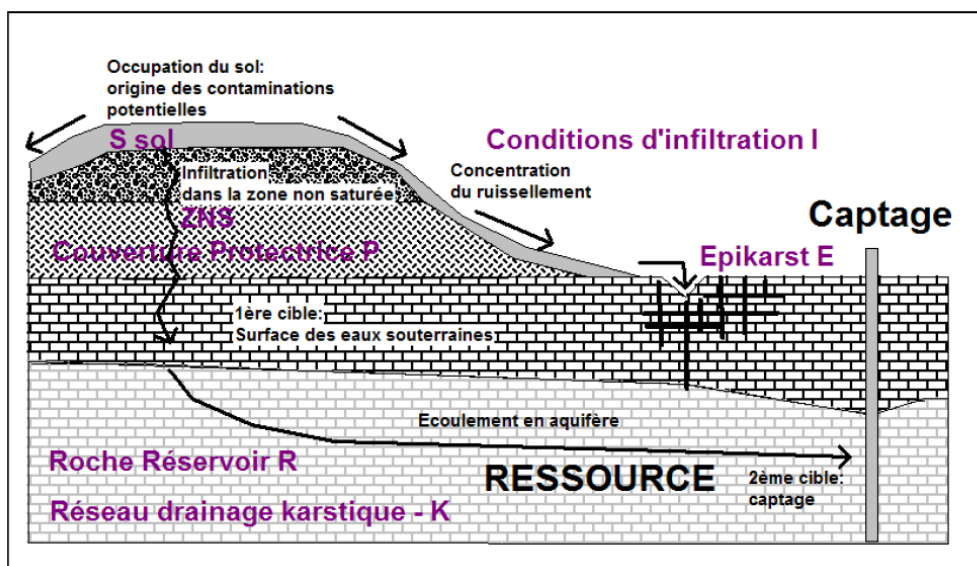


Illustration 31 - Schéma conceptuel d'un aquifère karstique avec le positionnement des différents critères utilisés pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque (Dörfliger & Plagnes 2009)

Un Système d'Information Géographique (SIG) est utilisé pour la mise en oeuvre de la méthode afin de faciliter l'établissement de la carte de vulnérabilité finale. La méthode consiste à identifier les caractéristiques qui définissent le classement des critères de 0 à 4, allant du moins au plus vulnérable. Un système de pondération est ensuite introduit permettant de traduire l'importance relative des critères les uns par rapport aux autres.

La méthode se déroule suivant 6 étapes après avoir délimité l'AAC (Illustration 32) :

- 1) Séparation de l'aire en zones karstiques et non karstiques (dans le cas d'un système karstique binaire) ; les deux secteurs seront traités séparément : pour la zone karstique, tous les critères doivent être cartographiés, tandis que pour la zone non karstique seuls les critères P et I sont cartographiés.
- 2) Cartographie de chaque critère à l'échelle adaptée à la dimension de l'aire d'alimentation ($1/10\ 000^e$ à $1/50\ 000^e$) et suivant les données disponibles. Chaque critère est subdivisé en 5 classes matérialisées par un indice allant de 0 à 4 (à l'exception du critère K : 1-4).
- 3) Discrétisation des cartes ainsi obtenues : la taille de la maille est définie en fonction du pas du **Modèle Numérique de Terrain** de la zone d'étude et des données disponibles (de préférence 25mx25m).
- 4) Calcul de l'indice de vulnérabilité global V_g 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 V_g . Cette étape revient à superposer les 5 cartes de critères indexés afin d'obtenir une représentation cartographique de la répartition de l'indice V_g .
- 5) Etape de reclassification : La valeur de l'indice V_g est ensuite subdivisée en 5 classes équidistantes de vulnérabilité traduisant la sensibilité du milieu aux influences naturelles et anthropiques à un instant donné.
- 6) Etape de vérification : Confrontation de la carte de vulnérabilité avec les données de terrain (données ponctuelles brutes avant interpolation) et les cartes de chaque critère indexé afin de vérifier qu'il n'y ait pas d'incohérence flagrante. Cette étape importante permet de modifier au besoin les pondérations voire de s'affranchir d'un critère dont la cartographie s'est avérée délicate.

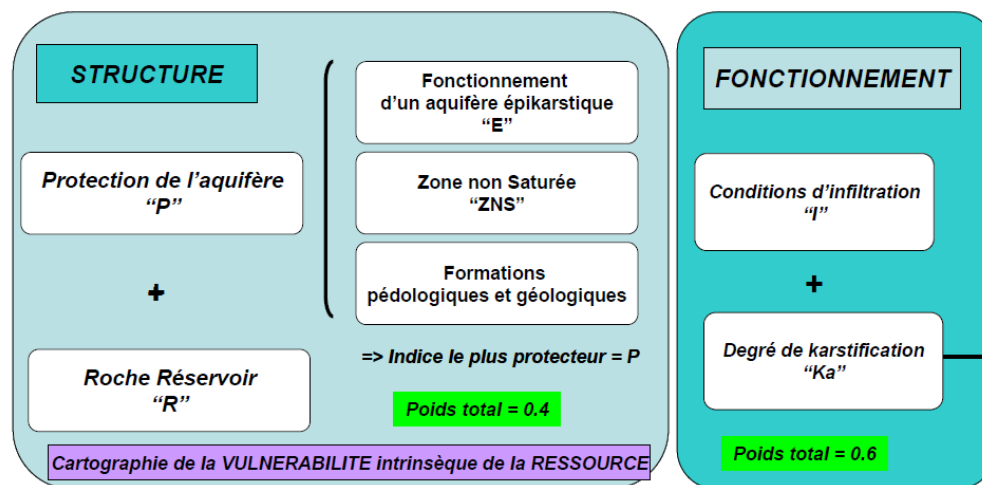


Illustration 32 - Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques

6.3.4 Paramètres pris en compte et classification

6.3.4.1 Critère P

L'évaluation du critère P diffère selon que le système karstique est unaire ou binaire (Illustration 10).

A. Cas des systèmes karstiques unaires

Le critère P est un critère de protection vis-à-vis de l'infiltration ; il caractérise l'aptitude à stocker de manière temporaire l'eau à proximité de la surface, celle-ci générant un effet de retard sur l'infiltration. Il dépend de trois (sous)-critères : « **sol ou couverture pédologique** » (S), « **aquifère épikarstique** » (E) et « **nature, épaisseur et fracturation de la zone non saturée** (ZNS) ». Le critère le plus protecteur vis-à-vis d'un transfert de contaminant vers la ressource ou vers la source est retenu, parmi ces critères, dans le cas où l'ensemble des critères peut être caractérisé. Le croisement des cartes des différents critères, à l'aide d'un logiciel SIG, permet de retenir l'indice minimum d'un des critères présents. Dans le cas où une zone de ruissellement aboutissant à une perte est présente sur les calcaires, cette zone sera traitée de la même manière que les bassins versants amont de pertes des systèmes karstiques binaires (cf. section 0 ci-dessous).

• (Sous)-critère E – Aquifère épikarstique

L'épikarst ou zone sous-cutanée correspond à la partie superficielle d'une formation carbonatée fortement altérée sous la couverture pédologique lorsqu'elle est présente ou exposée à la surface (Perrin et al. 2003b, Williams 2008, Gilli 2011). Son comportement hydrogéologique a été conceptualisé selon une approche systémique par Mangin (1975). La porosité et la perméabilité sont plus fortes dans la zone de l'épikarst puis diminuent fortement avec la profondeur. Par conséquent, l'eau qui s'infiltré suite à des précipitations, peut être stockée au niveau de l'épikarst. Ce niveau constitue ainsi un aquifère perché. Cet aquifère perché est drainé verticalement dans la zone non saturée, via des fissures et fractures. Dans certains cas, le contraste de porosité et perméabilité entre épikarst et zone non saturée plus profonde peut

ne pas être suffisant pour qu'un fonctionnement de type épikarstique se manifeste. L'épaisseur de l'épikarst est généralement pluri-métrique et peut atteindre jusqu'à quelques dizaines de mètres. Le stockage d'eau d'infiltration dans l'épikarst se manifeste par la présence de sources temporaires et de puits exploités sur les plateaux (ex. Causses).

Il est indispensable de prendre en considération le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère épikarstique dans la définition des indices de ce critère. Il faut de ce fait observer le fonctionnement de ce niveau caractéristique au niveau de carrières, en bordure de routes, afin d'apprécier s'il y a un rôle de stockage temporaire et un possible effet de retard à l'infiltration. La présence de lacs durant les périodes de fortes précipitations peuvent être le résultat soit d'un débordement de l'épikarst, soit d'une réduction de l'efficacité du système de drainage liée à la présence d'un niveau plus imperméable (dépôts argileux associés à un stade d'évolution de la karstification). De plus, l'unique existence de sources temporaires ne permet pas de confirmer l'existence d'un épikarst ; sa position, son degré de corrélation avec le fonctionnement hydrogéologique de la source captée, doivent être analysés. Si la source temporaire est une source de débordement suite à une mise en charge de l'aquifère, l'analyse des débits classés au niveau de la source principale devrait donner des indices.

Le terme « épikarst » employé ici par simplification signifie bien que cette zone a un comportement hydrogéologique particulier et qu'elle doit être prise en considération dans la méthode PaPRIKa comme un terme relatif à **l'existence d'un aquifère épikarstique**.

La mise en évidence d'une zone épikarstique n'est cependant pas toujours évidente, en particulier lorsqu'elle est recouverte. De plus, l'extension latérale de l'épikarst n'est pas forcément continue. L'identification de l'épikarst ne peut donc se faire qu'à partir d'observations au niveau d'affleurements le long de routes, dans des carrières, et de cartographie de points d'eau (sources temporaires attribuables à l'épikarst, avec repères altitudinaux, puits) (Illustration 33).

E1	aquifère perché avec présence de puits et d'un niveau piézométrique, voire d'un lac temporaire ;
E2	aquifère épikarstique continu latéralement avec des sources temporaires d'un débit de l'ordre du litre/seconde et existence de puits collectant les eaux ; effet de stockage vérifié ;
E3	existence d'un aquifère avec présence de sources de débits peu importants et d'une continuité latérale plus ou moins bien représentée ; l'effet retard est limité ;
E4	pas d'aquifère épikarstique

Illustration 33 : Indexation du sous-critère E – « aquifère épikarstique »

- **(Sous)-critère S (couverture pédologique et géologique)**

Le sous-critère S représente la partie supérieure de la couche du terrain qui contribue à la protection de la ressource vis-à-vis d'une infiltration diffuse ou accidentelle de pollution. Cette couche protectrice de surface correspond à l'épaisseur de la couverture recouvrant l'épikarst (s'il existe) ou recouvrant les roches réservoir du système karstique. La couche S protectrice est donc représentée, soit par la **couverture pédologique** (sol), soit par les **formations superficielles géologiques**.

La détermination de ce critère se fait de la même manière que pour les milieux continus (cf. 5.3.2 b).

- **(Sous)-critère ZNS (caractéristiques de la zone non saturée)**

La zone non saturée de l'aquifère assure le transfert de l'eau infiltrée vers la zone saturée, lieu des écoulements souterrains. **La lithologie, l'épaisseur ainsi que le degré de fracturation/fissuration vont influencer la vitesse de transfert.** La vulnérabilité sera d'autant plus importante que la roche est calcaire, l'épaisseur est faible et la fissuration importante (Illustration 34).

LITHOLOGIE de la ZNS (L_{ZNS})	
L_{ZNS0}	Couches d'argiles de forte épaisseur
L_{ZNS1}	Marno-calcaires, craie
L_{ZNS2}	Calcaires en petits bancs et/ou avec intercalations d'argiles
L_{ZNS3}	Calcaires en gros bancs massifs

Illustration 34 : Tableau décrivant la lithologie de la zone non saturée

Lorsque la zone non saturée est caractérisée par un ensemble hétérogène de lithologies différentes, on retiendra l'indice de la lithologie qui assure la plus grande protection.

L'**épaisseur** de la zone non saturée est estimée à partir de données issues de cartes piézométriques si celles-ci existent, par soustraction du niveau topographique de la cote piézométrique. Dans le cas où aucune carte piézométrique n'existe, l'épaisseur de la zone non saturée est estimée par défaut en appliquant un gradient hydraulique moyen supposé connu à partir de la cote altimétrique de l'exutoire¹¹. Trois classes d'épaisseur de la zone non saturée sont proposées : (i) < 15mètres, (ii) 15 à 50 mètres et (iii) 50 mètres et supérieur

Le **degré de fracturation** est caractérisé en considérant des affleurements et les zones de faille.

Le **sous-critère ZNS** est ainsi représenté sous forme de 5 classes, résultant de la combinaison des paramètres exposés ci-dessus (lithologie, épaisseur et fracturation) (Illustration 35).

ZONE NON SATUREE (ZNS)		EPAISSEUR		
		> 15m	15-50m	> 50m
Fracturation	Faible-moyenne	$L_{ZNS} + 1$	L_{ZNS}	L_{ZNS}
	Importante	$L_{ZNS} + 1$	$L_{ZNS} + 1$	L_{ZNS}
	Forte au niveau de faille	4	4	4

Illustration 35 - Indexation du sous-critère ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation

¹¹ Si la cote de l'exutoire est de 100 m NGF, que le gradient hydraulique est de 1%, et que l'altitude du sol, à 1 km en amont de l'exutoire est de 120 m NGF, l'épaisseur de la ZNS en ce point sera approximativement de 10 m.

$$Ep. ZNS = 120 - (100 + (1000 * 0.01)) = 10 \text{ m}$$

B. Cas des systèmes karstiques binaires

Pour les systèmes binaires, en plus de la caractérisation du critère P dans la partie endogène du système selon l'approche décrite ci-dessus, il convient d'évaluer le critère P également sur les bassins versants en amont des pertes. Dans ce cas, le critère P caractérise l'état de la surface vis-à-vis du refus à l'infiltration. **La même approche est aussi appliquée aux zones de ruissellement aboutissant à des pertes dans le cas des systèmes unaires.**

L'état de surface est pris en compte dans les bassins versants des pertes temporaires ou pérennes. **L'état de surface est le seul critère à renseigner** au niveau de ces bassins versants pour définir le critère P. Il peut favoriser ou retarder le ruissellement de l'eau, et ainsi le transport de polluants vers une perte. Cet état est contrôlé par la nature de la roche à l'affleurement (plus ou moins perméable) et/ou de l'existence des formations superficielles imperméables. L'existence d'une surface de faible perméabilité qui ne permet pas l'infiltration verticale, mais qui collecte et dirige les eaux vers un point d'engouffrement, constitue un élément de vulnérabilité élevée.

Les cours d'eau situés en amont de ces pertes ainsi qu'une zone tampon de 50 m de part et d'autre du lit du cours d'eau, sont également représentés en tant que zones ayant un état de surface d'indice de valeur 4 (Illustration 36).

ETAT DE SURFACE dans les bassins versants des pertes	
P1	terrains caractérisés par de fortes perméabilités : graviers et conglomérats non cimentés
P2	terrains caractérisés par des perméabilités moyennes : arènes granitiques (faciès d'altération - érosion de massif granitique), sables, calcaires
P3	terrains caractérisés par des perméabilités faibles : grès peu fissurés, conglomérats cimentés, roches magmatiques et métamorphiques saines (granites, gneiss, basaltes)
P4	terrains caractérisés par des perméabilités très faibles : argiles, marnes zones de cours d'eau pérenne ou temporaire

Illustration 36 : Indexation du critère P (état de surface) dans les bassins versants des pertes

6.3.4.2 Critère R

Le critère R « nature de la Roche du réservoir aquifère » caractérise la nature lithologique de la roche réservoir ; il est à apprécier en considérant d'une part la nature lithologique (calcaires à marnes) et d'autre part le caractère massif ou non des roches. De plus, il prend en considération le rôle de la fracturation que ce soit à l'échelle de l'affleurement ou à l'échelle de grands accidents régionaux si des indices forts montrent que ces accidents jouent un rôle sur le drainage des écoulements souterrains. Une zone de fracturation ou une zone de broyage au niveau d'un accident tectonique est prise en compte en considérant une zone tampon autour de la faille d'une dimension appropriée (50 à 100 m environ en fonction des observations de terrain). La nature lithologique du réservoir va influencer l'organisation des écoulements et le transfert des contaminants.

Le critère est spatialisé à partir des cartes géologiques, des observations de terrain, des données sur la nature du sous-sol dans des sondages, forages, voir des ouvrages souterrains (galeries, tunnels). La carte du critère R ne correspond pas forcément à la carte géologique, des regroupements de formations d'âge différents peuvent être effectués en considérant la nature lithologique (Illustration 37 et Illustration 38).

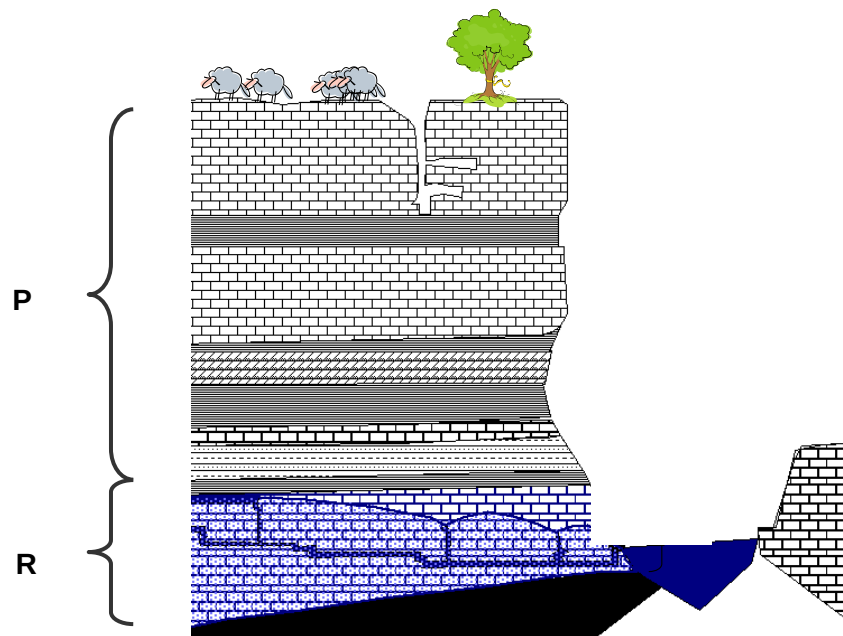


Illustration 37 - Définition du critère R dans le cas d'un aquifère karstique de type karst « classique »

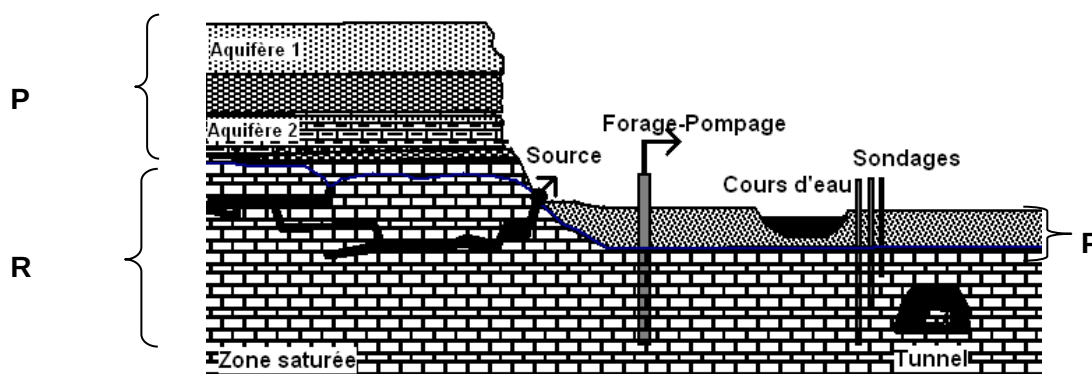


Illustration 38 - Définition du critère R au sein de la Zone saturée dans le cas d'aquifères superposés à partir de données à l'affleurement proche de la source, des données de forages-sondages, galeries et objets géotechniques de type tunnel.

La cartographie du critère **R** (lithologies et fracturation) est réalisée à partir des cartes géologiques au 1/50 000^e (éditions BRGM sur le territoire français) et de coupes géologiques réalisées au niveau des systèmes karstiques étudiés. La cartographie doit être complétée par des visites de terrain en particulier pour observer les litho-faciès, le type de fracturation et éventuellement évaluer l'importance des zones de broyage associées. Il n'est pas rare que la description lithologique d'une formation lithostratigraphique soit trop générale et ne détaille pas l'existence de variations latérales de faciès pouvant conduire à attribuer une autre valeur à

l'indice du critère R. Le critère R caractérisant la roche réservoir, il n'y a pas de lien direct entre les contours de la carte géologique et la carte du critère R.

La fracturation n'étant pas homogène à l'échelle d'une formation, d'un faciès ou d'une aire d'alimentation, elle doit être appréhendée sur le terrain, une fois les grands accidents reconnus à partir des cartes géologiques, en considérant l'orientation des fractures par rapport au gradient hydraulique (un drain est fonctionnel uniquement s'il est parallèle au gradient hydraulique). Une visite de terrain des principaux affleurements au niveau de routes, de carrières, etc. permet d'apprécier le caractère fracturé de la roche réservoir.

Les failles ou zones de failles présentes à l'échelle de l'AAC et affectant le réservoir seront prises en considération si leur rôle favorisant les écoulements souterrains est démontré. On attribuera une valeur d'indice de 4 sur une zone tampon autour de la zone faillée. La dimension de la zone tampon sera de 50 à 100 m de manière générale.

Les principales formations géologiques à potentialité aquifère ont été indexées en fonction de l'influence qu'elles peuvent avoir sur la vulnérabilité des aquifères (Illustration 39) :

Indice	Description
R₁	Cette classe regroupe les formations marno-calcaires (25-35% minéraux argileux) ainsi que la craie, affectée d'une fracturation faible qui auront une influence limitée en termes de vulnérabilité, les circulations d'eau restant relativement lentes.
R₂	Cette classe regroupe les formations de calcaires marneux (la proportion argileuse est plus faible que pour la classe R₁ : 10-25%), et la craie affectée d'une fracturation forte ; Calcaires et dolomies en petits et gros bancs avec fracturation homogène.
R₃	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	Cette classe regroupe les zones reconnues cartographiées ou de réseau de cavités et de zones de failles affectant le réservoir, parallèles au gradient hydraulique. Si la connaissance du réseau de conduits est incomplète, il peut être raisonnable de ne pas affecter d'indice R4 afin de ne pas introduire de biais dans la cartographie.

Illustration 39 - Indexation du critère R « réservoir roche aquifère »

En contexte structural accidenté pouvant présenter des pendages importants dans des formations carbonatées aquifères, il peut être justifié de rajouter une valeur de 1 à l'indice retenu à partir de la lithologie et de la fracturation dans les secteurs où l'on observe un **pendage des couches supérieur à 45 degrés** dans un sens favorable à l'écoulement en direction du captage.

6.3.4.3 Critère I

Le critère I permet de prendre en compte les conditions d'infiltration. Une des caractéristiques des aquifères karstiques est l'existence d'une dualité de l'infiltration à l'échelle de l'aire d'alimentation. L'infiltration peut se faire de manière diffuse au travers du sol ou du calcaire nu ou au contraire de manière concentrée d'eau de ruissellement superficiel au niveau de pertes temporaires ou pérennes ou de dolines/bassins fermés. Les conditions d'infiltration dépendent d'une part de la pente et d'autre part de l'occupation et de la nature du sol. Plus la pente est importante et le sol argileux, plus l'infiltration sera faible. **Il est toutefois important de**

s'assurer que le ruissellement quitte l'AAC, si ce n'est pas le cas la zone de ruissellement est au contraire très vulnérable puisqu'elle alimente des points d'infiltration préférentiels en aval. A contrario, plus la pente est faible et le sol caillouteux voir absent sur le calcaire mis à nu (lapiez), plus l'infiltration sera importante. La nature de la couverture pédologique étant prise en considération au niveau du critère P, elle n'intervient pas dans la caractérisation du critère I afin d'éviter la redondance de critère et des biais lors de la pondération pour l'établissement de la carte de vulnérabilité globale. Par contre, des objets morphologiques ayant une influence sur les conditions d'infiltration sont pris en compte dans la définition du critère I. Ces objets morphologiques exokarstiques sont les vallées sèches, les dolines et poljés, les lapiez, les gouffres et les pertes.

Indice	Description
I0	Cette classe regroupe les zones de l'aire d'alimentation où les pentes sont très fortes (>50%), induisant un ruissellement de l'eau très important hors de l'AAC et une infiltration très faible.
I1	Zones où les pentes sont fortes (15-50%) favorisant grandement le ruissellement hors de l'AAC et une infiltration faible.
I2	Zones de l'aire d'alimentation où la pente est moyenne (5-15%) et/ou zones où le ruissellement est limité en terrains carbonatés (ex. vallées sèches, lapiez peu développé verticalement).
I3	Zones à pente faible (0-5%) où le ruissellement est limité et l'infiltration beaucoup plus forte. Les zones avec dolines et poljés sont prises en compte dans cette classe. De plus, les lapiaz bien développés verticalement avec des cannelures métriques font partie de cette classe.
I4	Infiltration concentrée au niveau des pertes : à la perte elle-même est associée le bassin versant du cours d'eau l'alimentant dont l'état de surface est caractérisé à l'aide de P. Celui-ci peut être calculé à partir du MNT et des outils spécifiques du SIG (fonction bassin versant dans ArcGis). Pour les karsts en région de montagne, les bassins ainsi déterminés seront systématiquement trop grands par rapport aux zones réelles de ruissellement. Les dimensions de ces bassins seront donc ajustées aux observations.

Illustration 40 - Indexation du critère I « conditions d'infiltration ».

Les dolines, les poljés et lapiaz sont cartographiés en tant qu'objets morphologiques qui se surimposent à la carte des pentes. En fonction de la dimension d'une doline ou de dolines coalescentes ou de leur densité et au regard de l'échelle de travail, un regroupement de plusieurs dolines peut être effectué. L'ensemble de la surface de la doline est prise en considération.

Lorsque malgré l'existence de fortes pentes, aucun ruissellement n'est effectif, cela traduit l'existence de possibilités d'infiltration verticale (ex. cas rencontrés en montagne et sur plateaux pour des karsts dénudés). L'opérateur adaptera en conséquence la classe des pentes en fonction de ses observations, à condition que celles-ci soient représentatives d'épisodes de très forte intensité pluviométrique et l'indiquera dans la note explicative accompagnant la carte de vulnérabilité.

Les classes de pente pourront éventuellement être modifiées en prenant en compte la nature de la surface si celle-ci joue un rôle dans la répartition ruissellement /infiltration. C'est le cas des formations imperméables qui quelle que soit la pente favoriseront le ruissellement. Ce type de modification devra faire l'objet d'une justification détaillée dans le rapport accompagnant la carte de vulnérabilité.

6.3.4.4 Critère K

Le critère K « degré de karstification » est défini :

- A partir de la typologie des systèmes karstiques (Illustration 9).
- A partir de caractéristiques relatives à la fonctionnalité du système karstique : classification des systèmes karstiques selon l'analyse des courbes de récession des débits de source, vitesse et taux de restitution des essais de traçage, variabilité temporelle du débit et des paramètres physico-chimiques.

La fonctionnalité d'un système karstique traduit la structure des vides résultant de la karstification mais également de l'organisation des écoulements. L'aquifère est alors fonctionnel, caractérisé d'une part par l'existence de vitesses d'écoulement souterrain très rapides (jusqu'à quelques centaines de m/h) et par une variabilité spatio-temporelle des caractéristiques physiques et hydrauliques de l'aquifère.

De plus le caractère unaire ou binaire du système karstique est également pris en compte dans la définition de ce critère.

Les courbes de récession des débits (Q) sont simulées par la superposition de deux fonctions selon l'équation suivante (Mangin 1975, Marsaud 1997) (Illustration 41) :

$$Q = Q_{R0}e^{-\alpha t} + q_0\left(\frac{1 - \gamma t}{1 + \varepsilon t}\right)$$

Avec Q_{R0} le débit fictif correspondant à l'extrapolation de la courbe de tarissement à l'instant de la pointe de crue, α le coefficient de tarissement, ε le coefficient d'hétérogénéité d'écoulement, γ le coefficient de vitesse d'infiltration. Les coefficients sont obtenus par ajustements du modèle aux observations (ajustement de la fonction exponentielle sur le tarissement puis de la fonction homographique sur les données de décrue)

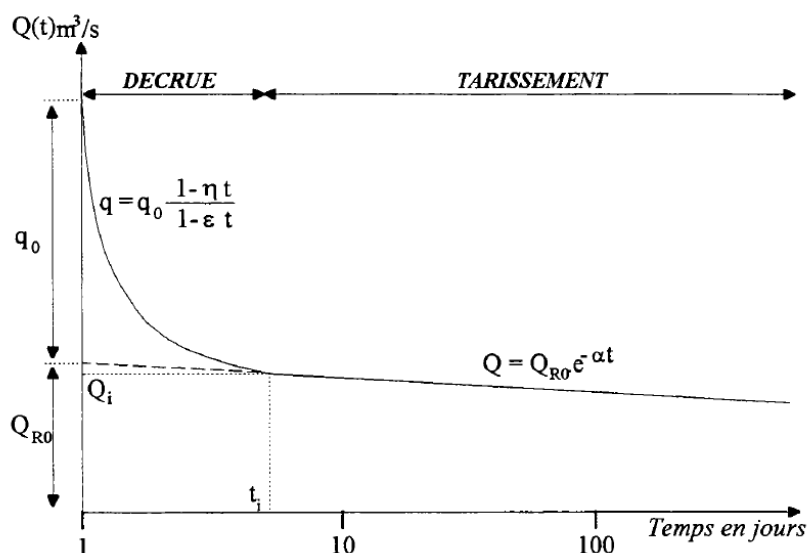


Illustration 41 - Décomposition de la récession du débit d'une source en deux fonctions reproduisant la décrue puis le tarissement (Marsaud 1997)

La première fonction, exponentielle, correspond à la vidange du réservoir non influencé par l'infiltration (phase de tarissement), elle permet d'évaluer le volume dynamique du réservoir. La deuxième fonction, homographique, correspond à la part du débit influencé par l'infiltration (phase de décrue).

La première fonction permet de calculer le volume dynamique (V_{dyn}) selon :

$$V_{dyn} = \int_{t=0}^{\infty} Q_{R0} e^{-\alpha t} = \frac{Q_{R0}}{\alpha} c$$

Avec c une constante de temps ($c=86400$ si Q_{R0} est exprimé en m^3/s et α en jours).

La classification de Mangin (1975) est basée sur l'interprétation des courbes de récession permettant de définir deux paramètres : k (abscisse) et i (ordonnée) (Illustration 42).

- **le paramètre k** traduit l'aptitude du système à stocker les précipitations et à les restituer au cours du temps : on parle de pouvoir régulateur ; il correspond au ratio du volume dynamique (V_{dyn}) exprimé en m^3 sur le débit moyen annuel (V_{trans}) exprimé en m^3/an . Idéalement, il faut disposer de chroniques de débits sur plusieurs cycles hydrologiques afin de pouvoir calculer des volumes dynamiques sur chaque tarissement et retenir le volume dynamique le plus élevé pour le calcul du paramètre k . Une telle chronique permet également une évaluation robuste de V_{trans} . Une valeur du paramètre k proche de zéro indique un pouvoir régulateur faible et donc une vulnérabilité plus forte ;

- **le coefficient i** compris entre 0 et 1, traduit l'écart entre les précipitations et la réponse à la source ; il correspond à la valeur de la fonction homographique deux jours après la pointe de la crue ; une forte valeur traduit une infiltration lente ou complexe contribuant à une meilleure régulation de l'écoulement, une faible valeur est à l'inverse le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée (Marsaud, 1997).

La classification de Mangin, reprise par El Hakim et Bakalowicz (2007) comprend 5 domaines de référence :

- (1) les systèmes complexes, systèmes généralement de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes ;
- (2) les systèmes karstiques plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval, et avec des retards dans l'alimentation liés soit à la présence de terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante ;
- (3) les systèmes intensément karstifiés aussi bien dans la zone d'infiltration que dans la zone noyée, avec un réseau de drainage très développé connecté directement à l'exutoire ;
- (4) les systèmes possédant une zone d'infiltration bien karstifiée et un réseau spéléologique bien développé de grande taille débouchant à l'aval sur un important karst noyé ;
- (5) les aquifères poreux ou fissurés ou aquifères karstiques non fonctionnels aujourd'hui mais qui ont pu l'être par le passé.

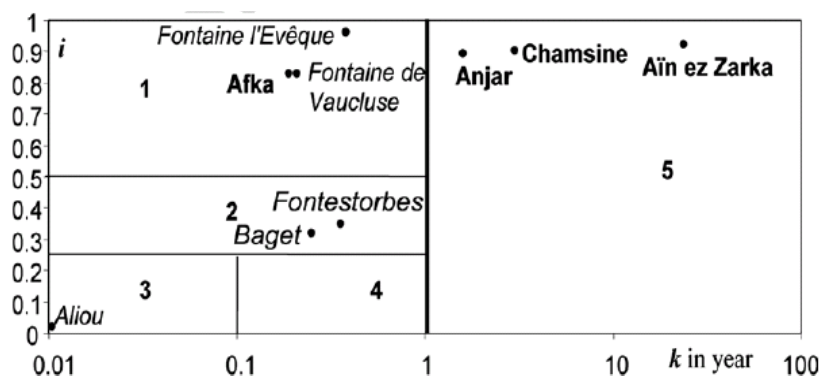


Illustration 42 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin 1975, El Hakim & Bakalowicz 2007)

Dans le cas où il n'existe pas de données d'hydrogramme sur au moins un cycle hydrologique permettant d'effectuer une analyse des courbes de récession, ni des données d'essais de traçage, l'attribution de l'indice du critère K se fait en considérant la typologie et le caractère unaire ou binaire du système. Il est recommandé de pouvoir tester deux scénarios, avec deux valeurs du critère K et d'apprécier l'effet sur la vulnérabilité globale.

Critère		Caractéristiques		Indice
K	Karstification	K ₁	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 1 (<10km², Q moyen annuel faible, Illustration 9) et uniquement si le système karstique est caractérisé par un comportement peu fonctionnel (faible variabilité du débit et des paramètres physico-chimiques), et en l'absence de preuves ou d'indices de circulation rapide.	1
		K ₂	Degré de karstification correspondant soit aux systèmes karstiques de type 2 (> 10 km²) ou de type 3, unaires et peu fonctionnels (sur la base d'indices caractérisant le degré de karstification tels que des vitesses de traçage artificiel rapides, la variabilité du débit et de la chimie de la source), soit à des systèmes complexes tels que définis dans la classification de Mangin (domaine de référence 1 ; cf. Illustration 42).	2
		K ₃	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 2 ou 3, fonctionnels et binaires/unaires ; il s'agit soit de systèmes karstiques binaires peu fonctionnels ou unaires très fonctionnels . Le réseau karstique de ce type de systèmes karstiques est bien développé avec la présence d'un drain collecteur de petite taille connu connecté avec la surface. Les vitesses de transit mises en évidence à l'aide d'essais de traçages sont importantes (entre 50 et 100m/h). Domaine de référence 2 de la classification de Mangin (cf. Illustration 42).	3
		K ₄	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques binaires du type 2. Le réseau karstique très bien développé avec la présence d'un gros collecteur connecté avec la surface, comme l'atteste la fonctionnalité du système. Les vitesses de transit mises en évidence à l'aide d'essais de traçage sont importantes (> 100m/h). Domaines de référence 3 voire 4 de la classification de Mangin (cf. Illustration 42).	4

Illustration 43 - Indexation du critère K

6.3.4.5 Calcul de la vulnérabilité globale (Vg)

Le calcul de la vulnérabilité globale (Vg) se fait sur la base de la formule suivante:

$$Vg = iI_{0-4} + rR_{1-4} + pP_{0-4} + kKa_{1-4}$$

La somme des poids (*i*, *r*, *p*, *k*) est égale à 1.

Des valeurs de pondération sont données pour chacun des critères, avec la règle suivante : la somme des pondérations des critères relatifs au fonctionnement de l'aquifère karstique (K et I) est comprise entre 50 et 65% alors que la somme des pondérations des critères relatifs à la structure de l'aquifère karstique (P et R) est comprise entre 35 et 50%. Les valeurs ne sont pas uniques, mais des intervalles de valeurs sont proposés, permettant à l'utilisateur de faire des tests, afin d'évaluer la sensibilité des critères (Illustration 44).

Critères	Abréviation	Pondération (%) Réservoir karstique	Pondération (%) Bassin amont des pertes
Protection	P	20-25	50
Roche réservoir	R	15-20	/
Infiltration	I	40-30	50
Karstification	K	20-30	/

Illustration 44 - Tableau des pondérations pour les différents critères de la méthode PaPRIKa

Sur les bassins versants des pertes alimentant l'aquifère karstique, seuls les critères P et I sont pris en compte avec une pondération équivalente ($0.5 P + 0.5 I$) pour la cartographie de la vulnérabilité.

6.3.4.6 Reclassification de la vulnérabilité globale (Vg)

La valeur finale de vulnérabilité varie donc entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale) (Illustration 45). Ces classes sont imposées pour être équidistantes. Il n'est pas nécessaire de chercher à faire apparaître toutes les classes de vulnérabilité sur la carte finale de vulnérabilité. Cette opération peut être réalisée sous un environnement SIG avec l'outil reclassification raster.

Valeurs indice	Classe	Vulnérabilité
3,2 – 4,00	4	Très élevée
2,4 – 3,19	3	Elevée
1,6 – 2,39	2	Modérée
0,8 – 1,59	1	Faible
0,0 – 0,79	0	Très faible

Illustration 45 - Tableau des classes de vulnérabilité globale (Vg)

6.4 EXEMPLES DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE D'AQUIFERES KARSTIQUES

6.4.1 Aquifère de la craie : système karstique de Cany-Barville (Normandie)

Le système karstique de Cany-Barville (Normandie) est développé dans la craie du Crétacé supérieur sous une épaisse couverture d'argiles à silex. L'eau est captée par 4 forages situés dans la vallée de la Durdent. Plus de détails sur cet exemple est donné dans le guide méthodologique PaPRIKa (Dörfliger & Plagnes 2009).

6.4.1.1 Critère P

Dans les zones amont des bétaires, la couverture argileuse favorise le ruissellement. L'indice P4 (état de surface) est donc donné à l'ensemble des bassins d'alimentation des bétaires. Pour le sol, l'épaisse couverture d'argiles à silex (>5 m) sur les plateaux est classée en S1. Elle est moins épaisse (20 cm à 1 m) sur les pentes supérieures à 10%, elle est ainsi classée en S2 tout comme le remplissage des fonds des vallées (graviers avec une matrice argilo-limoneuse de 5 à 10 m d'épaisseur). L'information fournie par l'analyse de la lithologie, de la fracturation et de l'épaisseur de la ZNS n'impacte pas la carte P finale puisque le sol (sous-critère S) montrent de fortes épaisseurs (S1) qui assurent une protection plus élevée (Illustration 46).

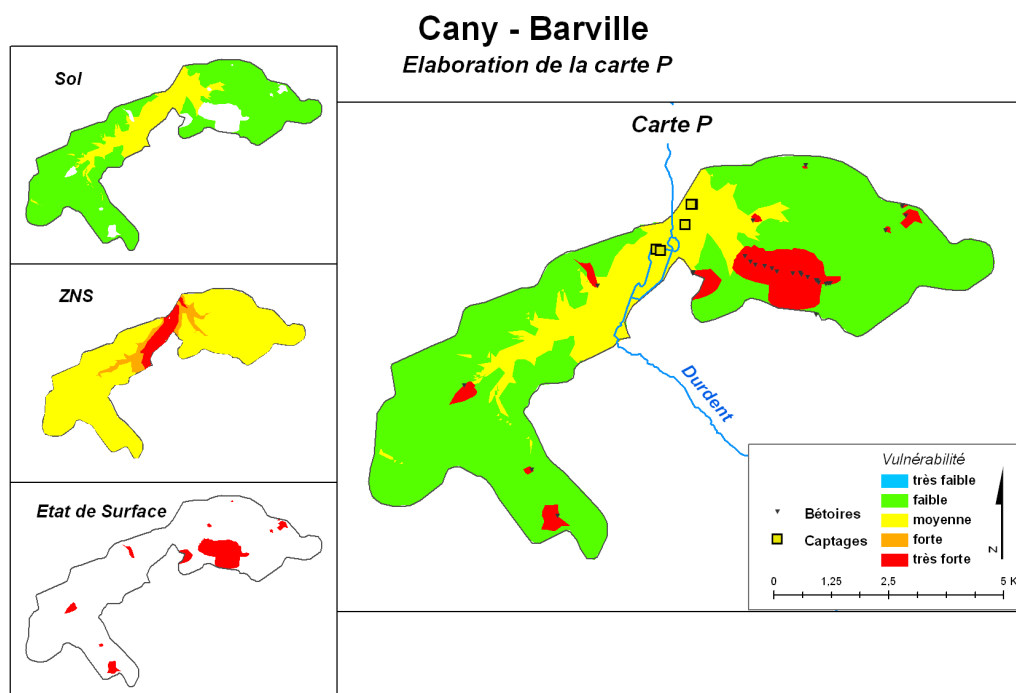


Illustration 46 - Carte du critère P du système karstique de Cany Barville (Normandie)

6.4.1.2 Critère R

Le réservoir de la craie au niveau régional est caractérisé par un indice **R2**. Les conduits karstiques, les vallées sèches et les zones faillées ayant une fracturation plus importante représentent un potentiel de karstification plus élevé et sont classés en indice **R4** (Illustration 47).

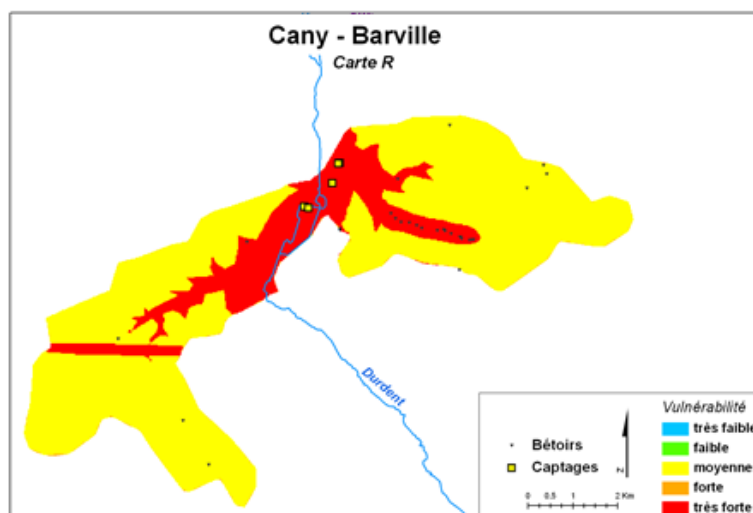


Illustration 47 - Carte du critère R roche du réservoir du système karstique de Cany Barville (Normandie)

6.4.1.3 Critère I

Les zones d'alimentation des bétouirs sont caractérisées comme très vulnérables et cartographiées en **I4**. Les pentes faibles (< 5 %) et les dolines (marnières) sont classées en vulnérabilité forte **I3**. Les pentes fortes et les vallées sèches sont classées en vulnérabilité moyenne **I2** (Illustration 48).

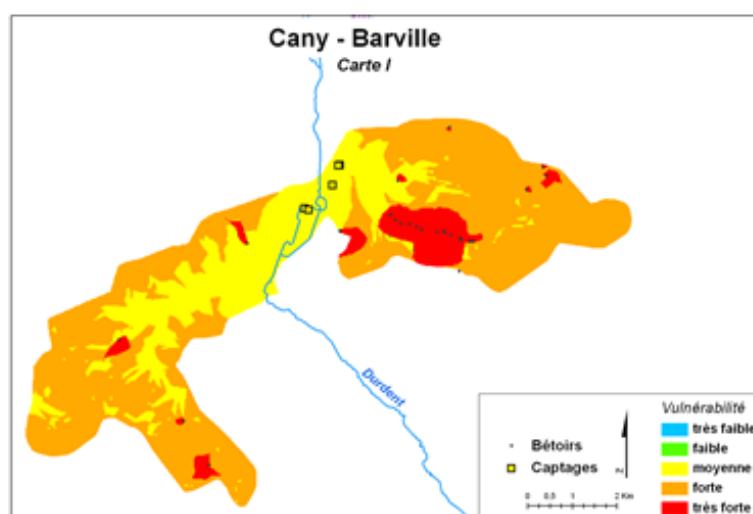


Illustration 48 : Carte du critère I du système karstique de Cany Barville (Normandie)

6.4.1.4 Critère K

La rive gauche de la Durdent est un système unaire caractérisé par un fonctionnement karstique modéré **K2**. La rive droite de la Durdent est un système karstique unaire mais très fonctionnel comme attesté par les traçages réalisés, il est donc classé en **K3**. Une zone caractérisée par de nombreuses bétouilles alignées est suspectée d'être connectée avec deux des forages exploités via un conduit karstique ; la zone est classée en **K4** (Illustration 49).

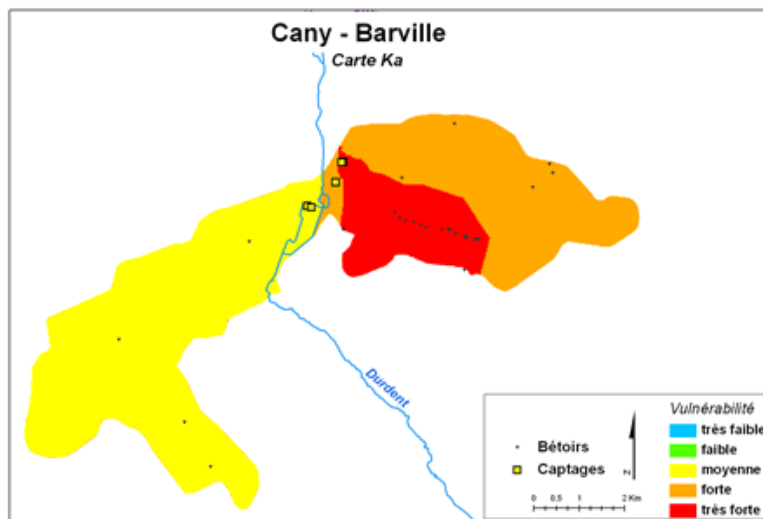


Illustration 49 - Carte du critère Ka du système karstique de Cany Barville (Normandie)

Des tests de pondération des quatre critères ont été effectués (Illustration 50). La gamme de pondération proposée permet de mettre en évidence sans ambiguïté les zones les plus vulnérables de l'aire d'alimentation. Le reste de l'aire d'alimentation peut être cartographié en vulnérabilité forte ou moyenne en fonction des pondérations choisies. La carte avec la pondération suivante $0.4I + 0.2R + 0.2P + 0.2K$ peut être retenue : elle permet de traduire la nature plus karstique de la partie de l'aire d'alimentation située au niveau de la rive droite de la Durdent et de mettre en évidence les zones de vallée sèche en tant que zones de vulnérabilité forte ; elle assigne également une vulnérabilité accrue aux bétouilles et à leurs bassins versants.

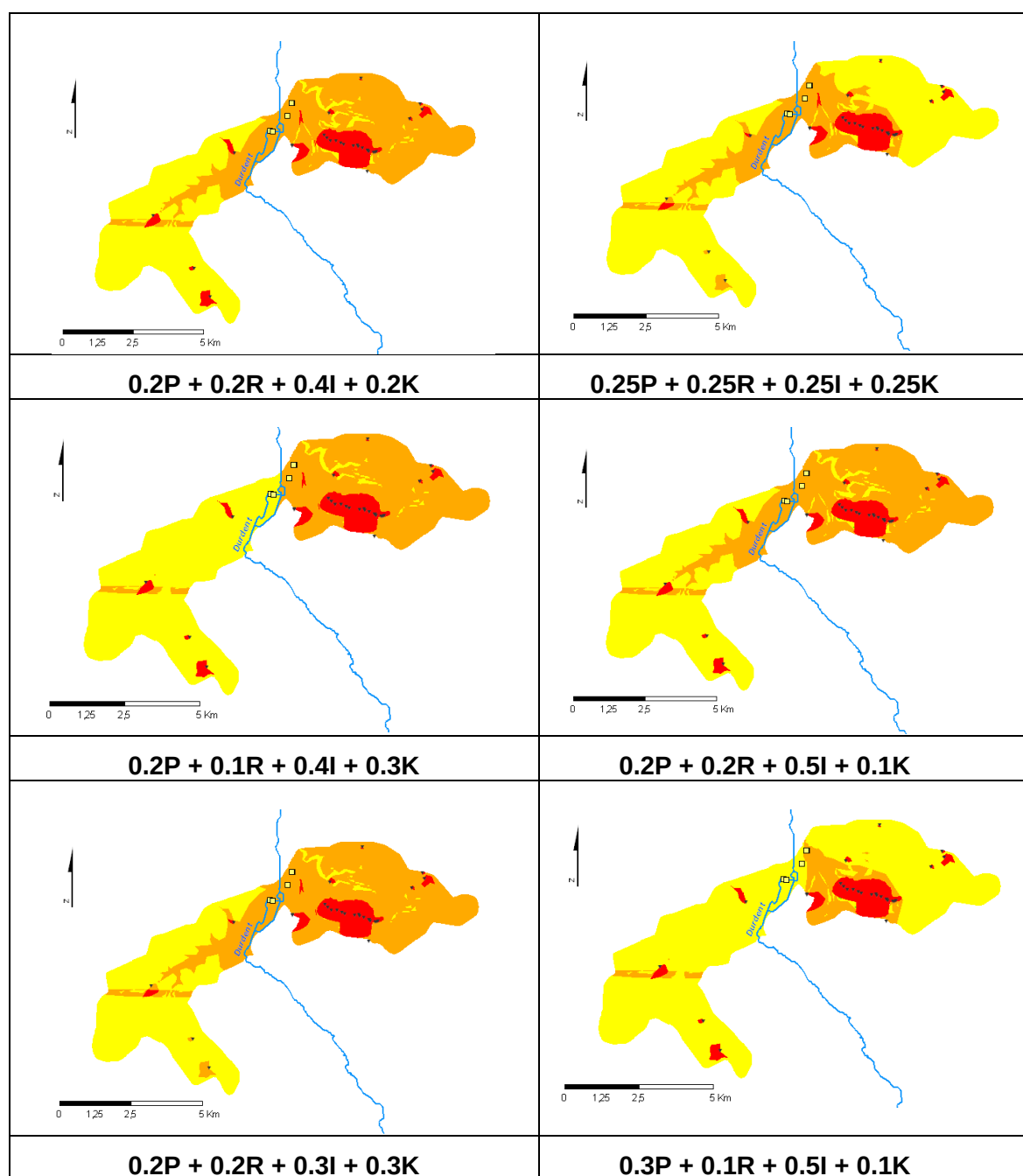


Illustration 50 - Cartes de vulnérabilité du système karstique de Cany Barville (Normandie), La carte retenue est la première.

6.4.2 Système karstique binaire de l'Ouyse (département du Lot)

Cet exemple est issu du guide méthodologique PaPRIKa (Dörfliger & Plagnes 2009) et des travaux présentés par Kavouri et al. (2011). Des informations complémentaires peuvent être trouvées dans ces deux publications.

6.4.2.1 Contexte géologique et hydrogéologique

Le système karstique de l'Ouyse est situé en la partie nord du Causse de Gramat (Illustration 51). Les eaux sont captées au niveau de deux résurgences dans la partie nord-ouest du bassin (Cabouy et Fontbelle) et au niveau d'un forage dans la partie centrale du Causse (Besaces). Les trois captages sont exploités pour l'alimentation en eau potable des communes du Causse nord de Gramat.

Le Causse de Gramat est constitué d'un massif carbonaté (épaisseur moyenne de plus de 500 m) monoclinal, légèrement incliné vers le SW. Cette structure fait affleurer l'ensemble de la succession sédimentaire, qui va du Jurassique moyen au Jurassique supérieur (Aalénien à Kimméridgien sup.). Toute cette série repose sur des terrains liasiques qui affleurent à l'Est du Causse. En dessous, se trouve le Trias avec des formations gréseuses et imperméables. Le Lias est représenté par un ensemble de marnes et de calcaires de la série de Limargue, qui se termine avec une couche épaisse d'argiles du Toarcien.

Le paysage est caractérisé par une morphologie karstique typique avec de nombreuses dolines, bassins fermés et gouffres. Enfin, les vallées sèches témoignent de l'existence de cours d'eau qui coulaient à l'époque sur la surface du Causse, avant que la karstification ne favorise leur infiltration.

La délimitation de l'AAC a été réalisée en prenant en compte la topographie, la géologie et la morphologie karstique dans un premier temps, mais également les résultats d'essais de traçages et des données hydrologiques et spéléologiques.

L'AAC peut être subdivisée en trois zones principales selon le fonctionnement hydrogéologique :

- 1) La partie Est du bassin, où les écoulements sont contrôlés par des réseaux hydrographiques de surface sur des terrains imperméables qui sont drainés vers un système de pertes se développant le long du contact marnes – calcaires.
- 2) Dans la partie calcaire du causse les écoulements sont souterrains, avec pour seule exception le ruisseau temporaire de l'Alzou dans le Nord. Quelques pertes sont également présentes sur le causse. La relation entre les résurgences et les pertes principales a été mise en évidence par plusieurs essais de traçages. Trois axes de drainage ont été reconnus par les spéléologues : la rivière souterraine des Vitarelles à l'Est, la rivière souterraine de Lacarrière à l'Ouest et la rivière souterraine de Viazac-Planagrèze au Sud.
- 3) A l'ouest du bassin, les marnes et les calcaires marneux du Kimméridgien supérieur ont un caractère semi-perméable qui permet les infiltrations pour des pluies faibles et favorise les ruissellements pendant les pluies fortes.

L'Ouyse est donc un système binaire et très fonctionnel qui contient une grande superficie de terrains imperméables. Il est principalement alimenté par des pertes actives à l'Est, l'Ouest et la partie centrale. Plus précisément, environ les 2/3 du débit de la résurgence de Cabouy provient des pertes de Thémines et Théminettes, situées 23 km à l'Est de la source. Le drainage se fait via des conduits karstiques bien développés.

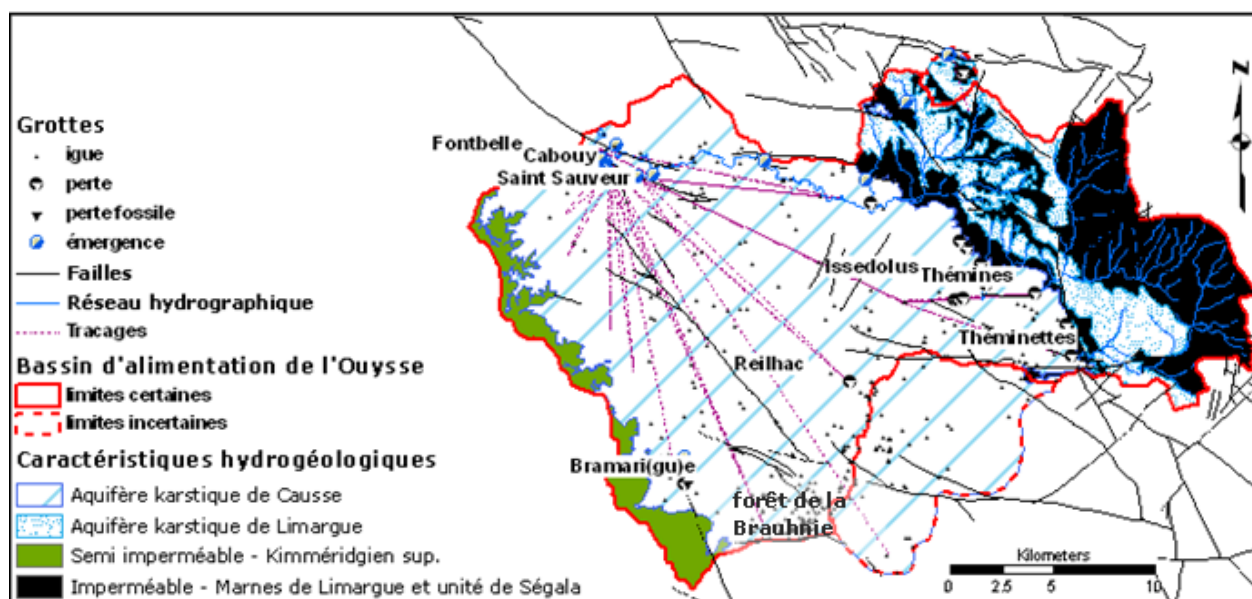


Illustration 51 - Carte hydrogéologique du système karstique de l'Ouyse et délimitation de l'aire d'alimentation en rouge

6.4.2.2 Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque

Critère P

Sur le plateau karstique (partie endogène du système), le critère P est composé de 4 sous-critères : l'état de surface, la zone non saturée, l'épikarst et le sol. La zone de ruissellement alimentant la perte de Bramarie dans le SW ainsi que la vallée de l'Alzou au Nord sont des zones de drainage superficiel et sont classés en P4 (état de surface).

La plupart des étages géologiques constituant la ZNS sont représentés par des calcaires et sont indexés en ZNS3. En revanche, l'indice ZNS2 est attribué à la formation de Cajarc (alternances de calcaires et de niveaux argileux). Les failles principales susceptibles d'influencer les écoulements sont classées en indice ZNS4.

L'épikarst est très développé dans l'ensemble des calcaires affleurant (E2). Il est moins épais et peu continu dans les niveaux du Bathonien terminal (E3). Le sol est très peu présent sur ce bassin. L'indice S1 est attribué aux altérites de la partie SW (sables, argiles sableuses et argiles, d'épaisseur de 1 à 3 m), l'indice S2 est attribué aux cailloutis à matrice argileuse et limoneuse d'épaisseur de 0,2 à 1 m, ainsi qu'aux dépôts des vallées sèches. Enfin, l'indice S3 est attribué aux remplissages des dolines (cailloutis à matrice argilo-sableuse, épaisseur <1 m).

Sur le bassin versant en amont des pertes, le critère P est caractérisé par un seul paramètre : l'état de surface. Le long des cours d'eau et sur une zone tampon de 50 m un indice de très forte vulnérabilité P4 a été attribué. Le même indice est appliqué aux zones d'affleurement des argiles alors qu'un indice P3 est attribué aux formations métamorphiques.

Critère R

Le réservoir karstique se développe dans les différents étages lithostratigraphiques de la série carbonatée. Cette série est constituée par des séquences de calcaires massifs en gros bancs

et des calcaires en petits bancs, quelquefois intercalés par des couches argileuses. Vu que l'ensemble est affecté par une fracturation très intense, aucune différenciation lithologique n'est effectuée pour la carte R. L'indice R3 est attribué à l'ensemble du réservoir. De plus, les conduits karstiques cartographiés et les accidents tectoniques sont indexés en très forte vulnérabilité R4.

Critère I

Pour la partie endogène du système, l'indice de très forte vulnérabilité I4 est attribué aux pertes et à leurs bassins versants. Les régions ayant une forte densité d'avens sont agrégées. La partie indexée en I3 correspond à des zones représentées par de nombreuses dolines. Enfin, les vallées sèches sont classées en vulnérabilité moyenne I2. La topographie étant moyennement marquée dans cette région, la carte I est dominée par la morphologie karstique, la carte des pentes est donc masquée.

Tout le secteur correspondant au bassin versant des pertes en zone non karstique à l'Est du système karstique est indexé en I4.

Critère K

L'Ouyse est un système karstique binaire, fonctionnel à très fonctionnel et ayant un réseau de conduits très développé. Les zones qui sont représentées par des écoulements souterrains très rapides sont indexées en K4. Ces zones sont d'une part la partie Est qui comprend la rivière souterraine des Vitarelles drainant également le bassin superficiel non karstique et d'autre part la partie Sud qui est drainée par les rivières souterraines de Lacarière et de Viazac. Le reste du système karstique est classé en K3.

La combinaison des quatre critères avec la pondération indiquée sur l'illustration 52 permet de proposer la carte de vulnérabilité de l'illustration 53. Une grande partie de l'AAC est en vulnérabilité élevée à très élevée (bassins versants de pertes). Cette forte vulnérabilité s'explique par la présence de zones d'infiltration concentrée et l'absence de couverture protectrice. Seule une petite bande au sud-ouest de l'AAC est en vulnérabilité moyenne. Cette bande correspond à des marno-calcaires moins karstifiées (formation de Cajarc).

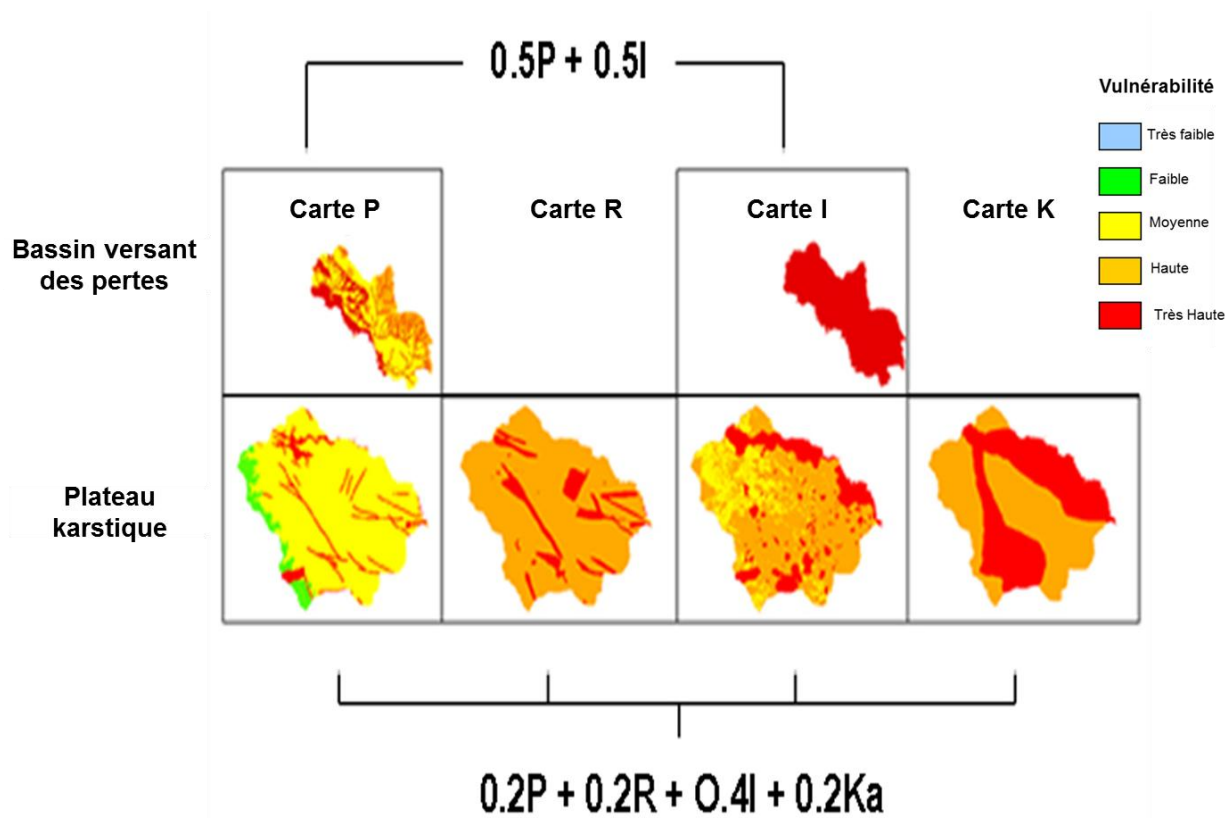


Illustration 52 - Cartographies des différents critères pris en compte dans les parties non karstique (bassin versant des pertes) et karstique du système karstique binaire de l'Ouisse

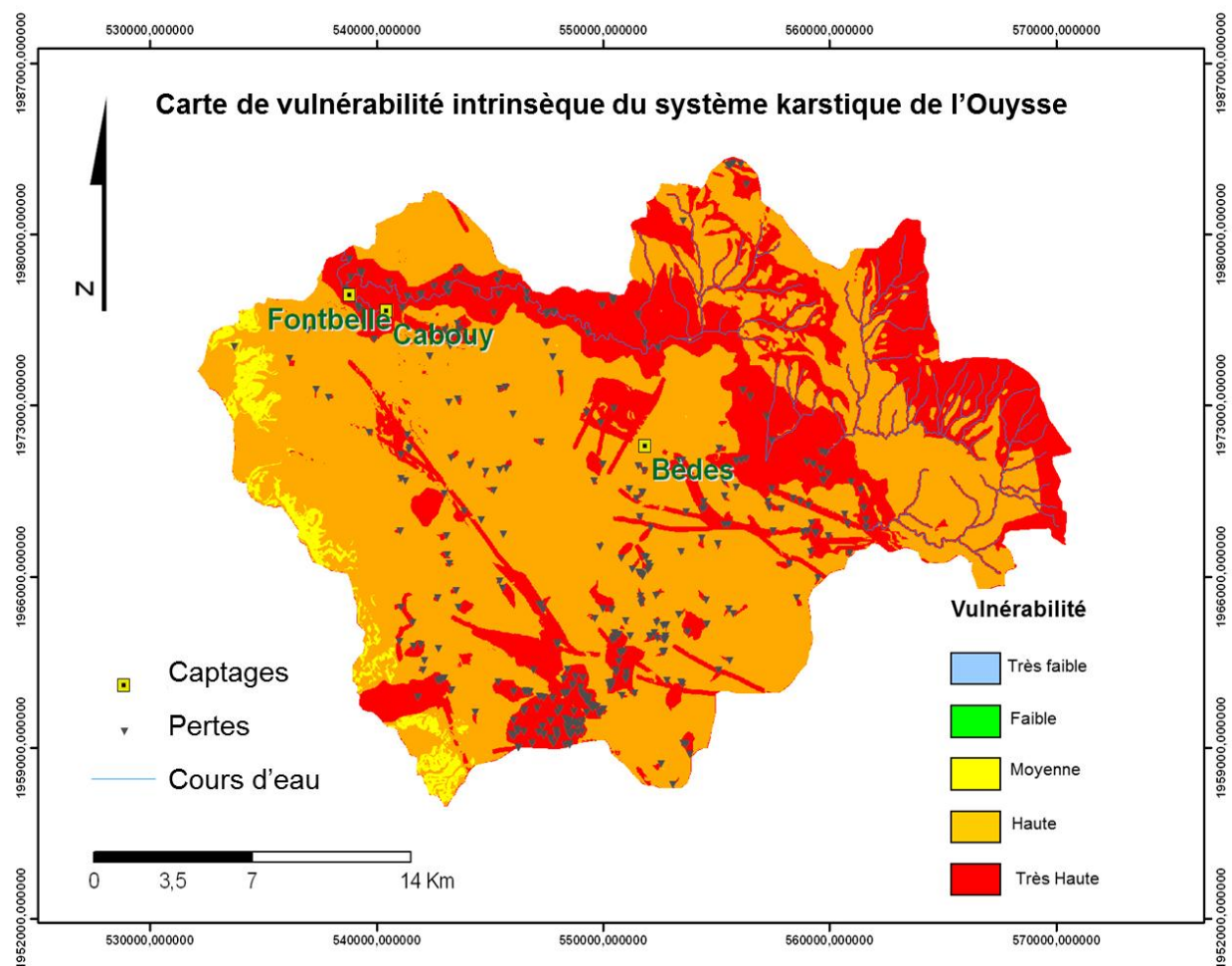


Illustration 53 - Carte de vulnérabilité intrinsèque du système karstique binaire de l'Ousse

7 Autres cas de figure

Les autres cas de figures concernent les aquifères discontinus fissurés et les aquifères volcaniques. Ils sont moins présents en France métropolitaine que les aquifères continus et karstiques. Les aquifères volcaniques sont par contre très présents dans les départements et territoires d'Outre-mer.

7.1 CAS D'UN SYSTÈME AQUIFÈRE DISCONTINU FISSURÉ

Un guide pratique a été élaboré en 2003 pour la délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré sur le territoire de la Suisse (Pochon et Zwahlen, 2003). Nous nous sommes largement inspirés de ce guide dans ce sous-chapitre, en particulier pour la méthode de cartographie de vulnérabilité (DISCO).

7.1.1 Étude et caractérisation du bassin versant hydrogéologique

L'étude hydrogéologique préalable à la délimitation de l'AAC doit permettre de répondre à plusieurs questions :

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

De façon plus générale, l'étude hydrogéologique doit permettre de faire le point sur les données disponibles et sur celles qui doivent être acquises (cf. tableau du chapitre 3). Elle doit également permettre de choisir la méthode de cartographie de vulnérabilité la plus adaptée, à savoir DISCO si le milieu est fortement hétérogène ou la méthode de cartographie pour les milieux continus (cf. 5.3) si le milieu fissuré est faiblement hétérogène (Illustration 8).

7.1.2 Délimitation de l'AAC

La délimitation de l'AAC est réalisée d'une part à partir de la géologie (coupes transverses), et d'autre part de mises en évidence de connexions hydrauliques résultant d'essais de traçage artificiels (Illustration 54). La superficie de l'AAC peut être approchée également par le calcul du bilan hydrologique annuel.

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

peut être obtenu à partir d'études hydrologiques et pédologiques de caractérisation du ruissellement, ainsi que par de l'observation de terrain (caractéristiques des sols, drainage agricole, ...).

La superficie de l'AAC est déterminée par le rapport du débit annuel du captage à la lame infiltrée. Il s'agit d'une surface à minima, correspondant au cas d'une source, exutoire du bassin versant souterrain. Les limites du bassin sont ensuite ajustées en fonctions des conditions hydrogéologiques locales (topographie, structure géologique, présence d'autres résurgences, contribution à des systèmes d'écoulements plus profonds).

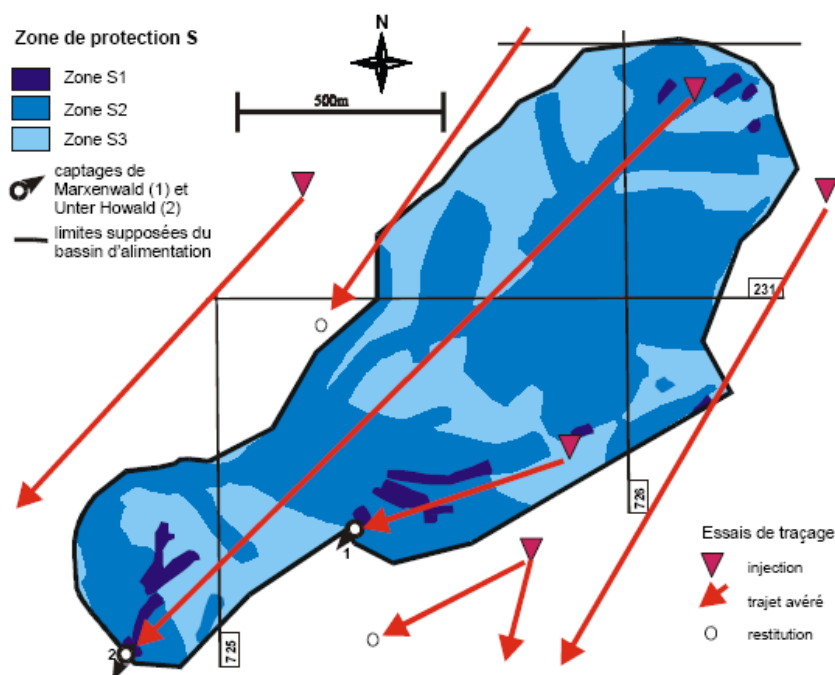


Illustration 54 – Exemple de délimitation d'une AAC en milieu discontinu à partir d'essais de traçages (Pochon et Zwahlen, 2003)

7.1.3 Cartographie de la vulnérabilité

7.1.3.1 Choix de la méthode

La méthode multicritère DISCO (Pochon & Zwahlen, 2003) a été développée pour les captages situés dans les milieux **fortement hétérogènes**, en présence de circulations fissurales très rapides (d'une centaine de mètres ou plus par jour). Cette méthode a été retenue pour la caractérisation des AAC en milieu fissuré très hétérogène, dont le comportement hydrogéologique traduit une forte vulnérabilité (réponses très marquées du captage en termes de débit et de paramètres physico-chimiques suite à des événements pluvieux).

Il faut insister sur le fait que si ce type d'aquifère est fréquemment présent en Suisse, il l'est beaucoup moins en France. Si l'aquifère est fissuré sans pour autant être caractérisé par une forte hétérogénéité et des circulations fissurales très rapides (ce qui est souvent le cas en France dans des formations calcaires hors karsts, crayeuses ou gréseuses), la méthode DISCO

ne doit pas être appliquée sous peine de conduire à une carte de vulnérabilité erronée ; il vaut mieux dans ce cas utiliser la méthode de cartographie de vulnérabilités des milieux continus.

7.1.3.2 Paramètres pris en compte et classification

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

- les discontinuités D (par exemple zone fracturée fortement perméable en connexion rapide avec le captage),
- la couverture protectrice P (sol et formations superficielles surmontant l'aquifère),
- le ruissellement R d'eau en surface avant son infiltration.

La première étape consiste à évaluer les paramètres « discontinuités » D (note entre 0 et 3) et « couverture protectrice » P (note entre 0 et 4) puis à calculer le facteur de protection intermédiaire $F_{int} = 2 \cdot D + P$ (note entre 0 et 10). Une cartographie du facteur de protection final F est calculée en prenant en compte le paramètre « ruissellement » en amont des surfaces caractérisées par un F_{int} faible, ce qui nécessite de délimiter les bassins versants de surface alimentant par ruissellement les zones les plus vulnérables à l'infiltration. Dans ces bassins versants, F est égal à la valeur F_{int} des surfaces vulnérables qu'il alimente. En dehors de ces zones, F est égal au F_{int} défini lors de la 2ème étape (Illustration 55).

Pour le paramètre D « discontinuités », les classes sont les suivantes :

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

A noter que contrairement aux cas précédents, l'indice augmente avec la protection et non pas avec la vulnérabilité.

Pour le paramètre P « couverture protectrice », la méthode DISCO propose une évaluation très proche de celle du paramètre « Sol » utilisées pour les milieux continus et karstiques, avec 5 classes, P₀ à P₄

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

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

Le facteur de protection intermédiaire est calculé à partir d'une combinaison linéaire des deux paramètres précédents : $F_{int} = 2 \cdot D + P$

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

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

Pour la détermination de l'extension des surfaces à considérer lors de la prise en compte du paramètre « ruissellement », la méthode DISCO propose les valeurs indicatives suivantes :

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

Au final, DISCO permet d'établir une carte de « protection » (Illustration 55) qui est l'inverse d'une carte de vulnérabilité : protection faible = vulnérabilité forte et inversement.

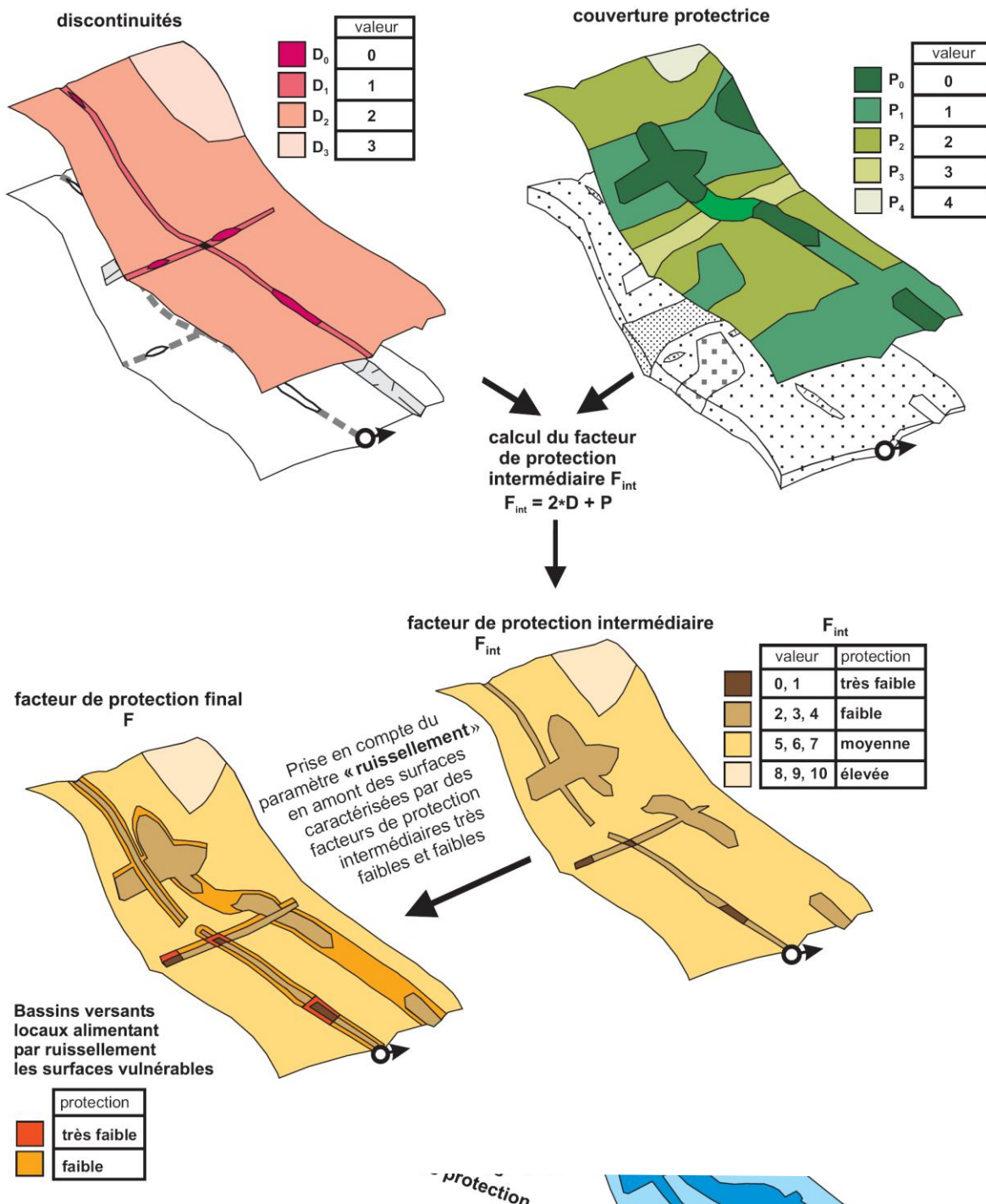


Illustration 55 – Méthode de cartographie multi-critères « DISCO » (Pochon et Zwahlen, 2003)

7.2 CAS D'UN SYSTEME AQUIFÈRE VOLCANIQUE

Les formations volcaniques comportent une grande diversité de lithologies et de conditions de mises en place, puis d'évolution dans le temps. Cette multiplicité des contextes engendre une forte variété de comportement hydrogéologique, qui conduit à proposer une approche basée sur un retour d'expérience et une typologie des roches volcaniques conditionnant leur comportement hydrodynamique (cf. 4.1.5).

La nature des formations volcaniques, leur degré d'altération mais aussi le degré de connaissance dont on dispose (concernant par exemple la géométrie des réservoirs) vont fortement conditionner la démarche qui sera adoptée. Compte tenu i) de la diversité des formations et ii) de l'hétérogénéité de leur altération, il n'est pas envisageable de proposer une démarche unique pour ce type d'aquifère. C'est donc dans la suite essentiellement une approche sous la forme de retours d'expérience qui est proposée.

Deux exemples d'application sont présentés : ils portent sur les îles de Mayotte (Castillo et al., 2013) et de La Réunion (Aunay et al., 2010). Les chapitres suivants en sont très largement inspirés.

7.2.1 Délimitation de l'AAC

De façon générale, la délimitation des AAC en domaine volcanique est délicate compte tenu de la complexité des aquifères concernés. Leur géométrie est ainsi souvent très difficile à déterminer, la continuité des niveaux piézométriques peut facilement être remise en cause à cause de la présence de barrières hydrauliques. L'hétérogénéité des lithologies et de l'altération des roches rend l'exercice d'autant plus compliqué.

Il n'en demeure pas moins que certains principes évoqués pour d'autres contextes hydrogéologiques peuvent le cas échéant s'appliquer en domaine volcanique. La liste n'est pas exhaustive mais on peut citer par exemple :

- la connaissance des limites structurales ou géologiques, imposant une certaine géométrie de l'aquifère capté ;
- la connaissance de zones d'alimentation préférentielle, notamment au droit des cours d'eau le cas échéant pérennes mais surtout temporaires ;
- le calcul d'un bilan basé sur la comparaison entre les sorties du système aquifère (exutoires, prélèvements) et l'estimation sur le long terme du renouvellement de la ressource en eau souterraine. Ce calcul vise à s'assurer que la surface de l'AAC déterminée n'est pas sous-estimée.

D'autre part, dans un tel domaine, la question du modèle considéré pour représenter les écoulements souterrains est cruciale. On distingue ainsi par exemple deux catégories principales pour le volcanisme insulaire :

- le modèle hawaïen (Peterson, 1972 ; MacDonald et al., 1983 – cf. Illustration 56), qui suppose l'existence d'une « nappe de base » en équilibre avec les eaux marines. Dans cette représentation, la « nappe de base » s'écoule au sein d'un empilement de coulées, de faible épaisseur unitaire, très perméable et dépourvu de dykes, qui constitue le volcan bouclier. Cette nappe montre de faibles gradients hydrauliques et des niveaux piézométriques peu élevés, même à une distance relativement importante du littoral. La partie interne des îles présente des « nappes perchées » déconnectées de la « nappe de base » et d'un volume bien plus réduit que celle-ci ne permettant généralement pas une alimentation pérenne des sources ;

- le modèle des Îles Canaries (Custodio, 1978, 1989 – cf. Illustration 57) propose à l'inverse une représentation dans laquelle il existe un unique aquifère de base continu de la partie basale jusqu'à la partie interne de l'île. Ce type d'île peut être assimilé à un massif poreux peu perméable, particulièrement dans le sens perpendiculaire au littoral.

Join et al. ont proposé plus récemment (2005) une nouvelle approche de l'hydrogéologie du Piton de la Fournaise sur l'Île de la Réunion.

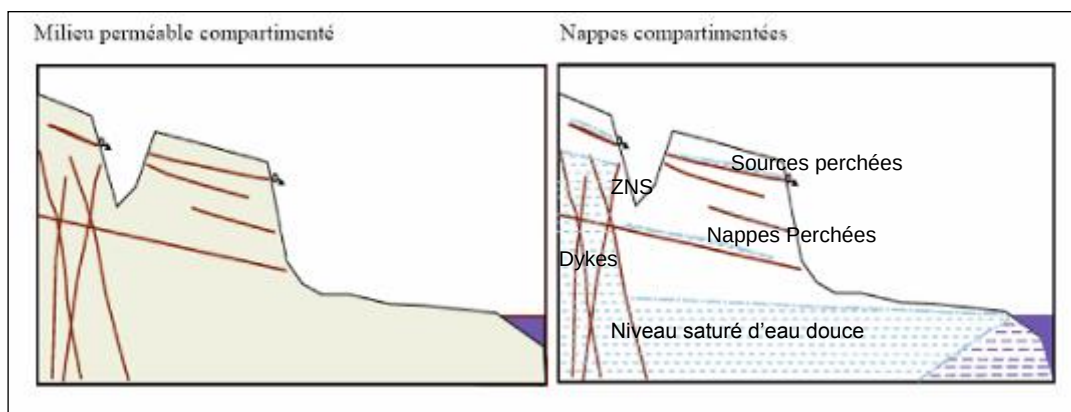


Illustration 56 : Modèle « Hawaïien » (Mac Donald et al, 1983)

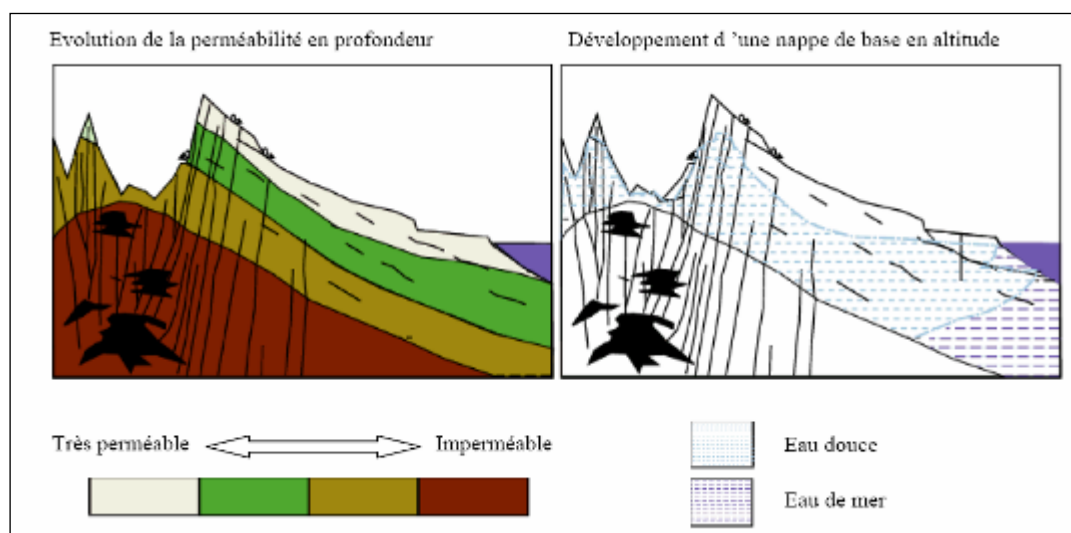


Illustration 57 : Modèle « Canarien » (Folio, 2001)

7.2.1.1 Cas de Mayotte

En 2009, un premier travail de délimitation avait été réalisé à Mayotte (Malard et al., 2009). Il avait conduit à constater une méconnaissance problématique de la géométrie des aquifères, puisqu'il n'était pas possible de cartographier leur extension. Depuis 2009, plusieurs campagnes d'acquisition de données ont été menées afin de palier à cette question, à commencer par l'acquisition de données TDEM (TDEM : Time Domain Electro-Magnetic).

Une campagne de prospection géophysique hélicoptérée a été réalisée en octobre 2010 : elle a permis de fournir à l'échelle de l'île la résistivité des formations présentes dans les 150 à 200 premiers mètres de profondeur. Il est alors possible de définir des corps géométriques de résistivité homogène, que l'on cherche ensuite à apparenter à des formations géologiques en se calant sur les résistivités observées à l'affleurement et en forage.

Les acquisitions TDEM permettent ainsi de mieux contraindre la géométrie des unités géologiques et ceci sur des étendues géographiques importantes (à l'échelle de l'île). Cela en fait à ce titre un outil très intéressant pour la délimitation des AAC.

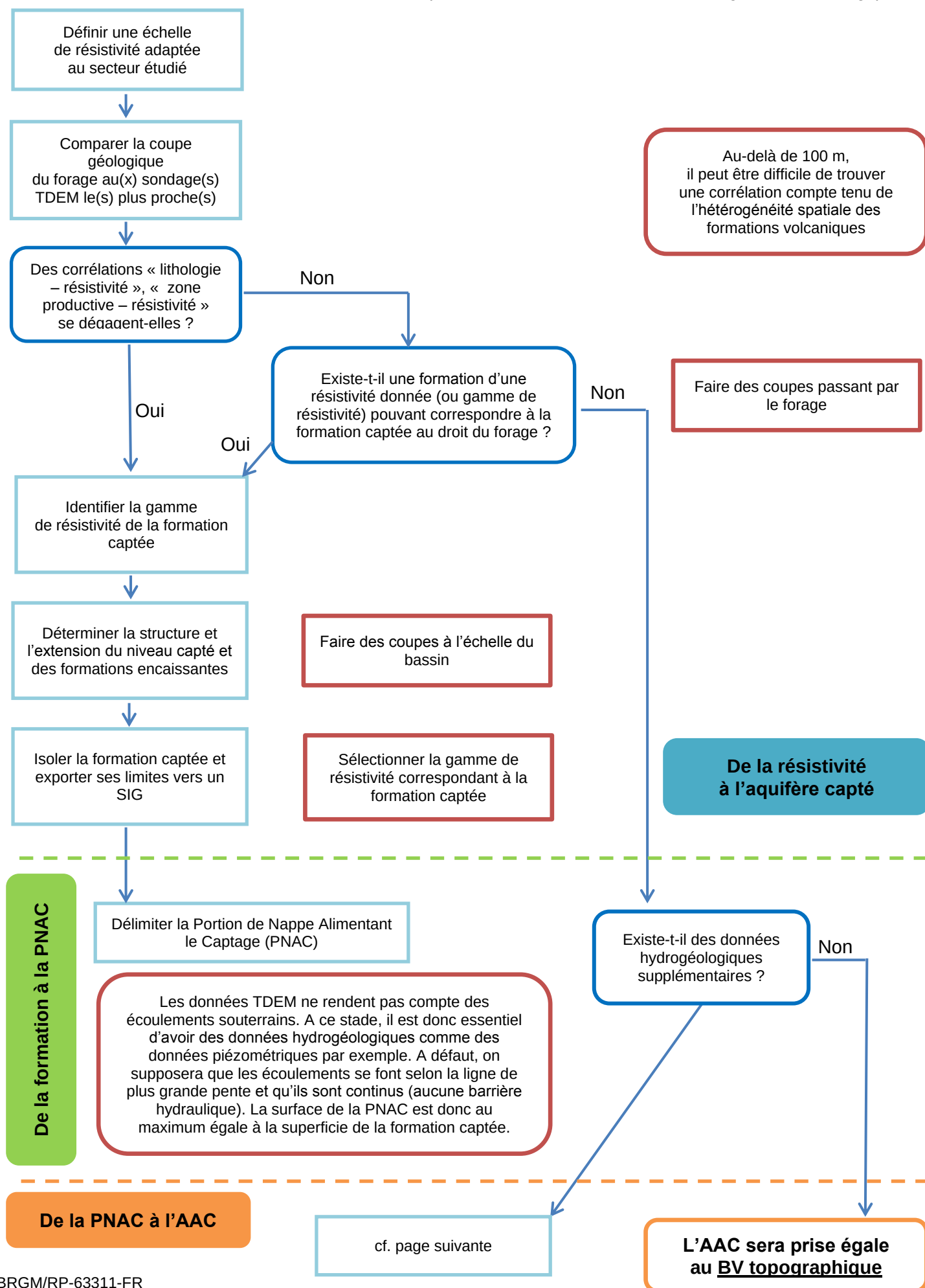
Il est néanmoins important de noter que ces données TDEM ne peuvent pas être interprétées sans information de calage (carte géologique, forages etc.). Leur bonne exploitation est ainsi soumise à quelques règles. C'est la raison pour laquelle le chapitre méthodologique est articulé autour d'un logigramme intitulé « Utilisation des acquisitions TDEM dans le cadre d'une délimitation d'AAC » (Illustration 58). Le logigramme donne la démarche à suivre, les questions à se poser et les opérations minimales à réaliser pour pouvoir utiliser au mieux les données TDEM dans le cadre d'une délimitation d'AAC.

Le logigramme indique en titre l'objectif principal, puis décline :

- sous forme de carré **bleu** avec coins arrondis, les principales questions binaires (« oui » ou « non ») permettant d'enchaîner le déroulement logique de la démarche,
- sous forme de carré **bleu pâle**, la dénomination de l'étape à réaliser,
- sous forme de carré **rouge**, des conseils ou remarques sur l'étape en cours.

Des précisions sont fournies dans les paragraphes qui suivent afin de préciser le contenu et les objets des différentes cases de ce logigramme.

Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses - Version révisée du guide méthodologique



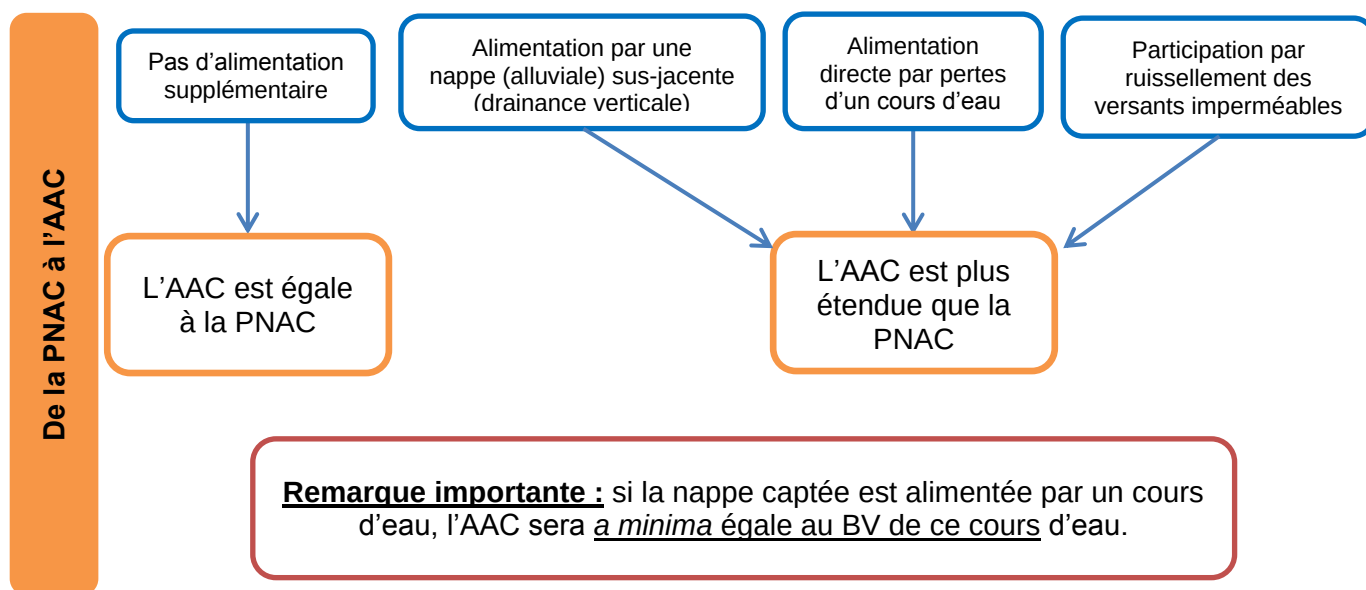


Illustration 58 - Logigramme expliquant comment utiliser les données TDEM dans une démarche de délimitation d'AAC (Castillo et al., 2013).

« De la résistivité à la formation »

A ce stade, la démarche proposée nécessite peu de données géologiques et hydrogéologiques complémentaires en dehors des observations faites lors de la foration du captage étudié et des ouvrages à proximité quand ils existent (coupe géologique et venues d'eau à l'avancement). Il est également important de noter que la démarche ne se concentre pas uniquement sur le niveau aquifère. Le TDEM offrant une image 3D du sous-sol, il est en effet important de s'intéresser dès ce stade aux différentes formations afin de caractériser leur géométrie. Par exemple, dans le cas d'une nappe sous recouvrement très peu perméable¹², il peut être essentiel de délimiter ce recouvrement comme est délimité l'aquifère (c.-à-d. : en identifiant sa résistivité, en l'isolant puis en l'exportant vers un SIG). Dans ce cas, il est en effet possible d'identifier une zone à proximité du captage qui ne participe pas à son alimentation. Elle ne fait donc pas partie de l'AAC et doit donc être retirée.

Cette étape d'analyse des données TDEM est déterminante pour la suite de la démarche. En effet, s'il apparaît dès lors que les acquisitions TDEM sont difficilement exploitables et ne calent pas avec les observations locales (carte géologique, forage(s)), il ne faudra pas les utiliser par la suite. Dans ce cas, on passera directement à l'étape suivante qui vise à délimiter la PNAC.

« De la formation à la PNAC » (ou délimitation de la PNAC)

La PNAC représente le lieu de l'ensemble des particules d'eau situées en un endroit quelconque de la zone saturée qui termineront leur course dans le captage. Les données TDEM ne permettent pas, à elles seules, de rendre compte des écoulements souterrains. Il est donc clair qu'à ce stade la démarche nécessite l'utilisation de données hydrogéologiques complémentaires et, notamment, de données piézométriques.

Il n'existe pas, actuellement, de cartes piézométriques sur l'île de Mayotte. Toutefois, il semblerait que le niveau piézométrique et l'altitude du sol suivent une relation linéaire. Ce schéma d'écoulement général, « dans le sens des plus grandes pentes », sera reconsidéré le cas échéant si des éléments de connaissance supplémentaires permettent d'envisager des écoulements selon des directions différentes (ex. présence d'une barrière hydraulique). Il est clair que la continuité des niveaux piézométriques peut facilement être remise en cause en milieu volcanique du fait notamment de l'hétérogénéité des lithologies et de l'altération des roches. C'est pourquoi toutes les informations hydrogéologiques collectées au cours de la phase de synthèse préliminaire devront être considérées afin de contraindre au mieux ce point (résultats des pompages d'essais, de traçage etc.). Les informations acquises lors des campagnes de tomographie électrique (méthode plus sensible aux variations latérales que le TDEM) pourront s'avérer également utiles pour localiser des discontinuités « subverticales » non observées avec le TDEM et constituant des éventuelles barrières hydrauliques (à confirmer par des informations hydrogéologiques). A défaut de connaissance discriminante, la continuité hydraulique sera supposée.

L'extension vers l'aval de la PNAC pourra le cas échéant être approchée par un calcul de zone d'appel (cf. § 5.2.2).

¹² On entendra ici par « très peu perméable » une formation dont la perméabilité est inférieure à 10^{-9} m/s.

« De la PNAC à l'AAC »

Les formations affleurantes sont généralement altérées à Mayotte. Les aquifères sont ainsi généralement situés sous plusieurs mètres, voire dizaines de mètres, de formations superficielles (altérite, alluvions, colluvions etc.). Ce recouvrement peut cependant autoriser une recharge des aquifères sous-jacents. Des phénomènes de drainance verticale sont ainsi suspectés en plusieurs points de l'île, comme par exemple sur le site de Mronabéja. Dans ce cas, tous les points de la surface du sol situés au droit de la PNAC participent à l'alimentation du captage par infiltration directe des eaux météoriques. L'AAC correspondante sera donc *a minima* égale à la projection en surface de la PNAC. Le cas échéant, il faudra ajouter à cela la participation des cours d'eau venant de l'amont, des versants contribuant à l'alimentation de la PNAC par ruissellement et d'autres bassins versants souterrains (par exemple : une source qui alimente une rivière qui alimente elle-même par infiltration un aquifère sous-jacent).

Synthèse

Les données TDEM ne sont qu'un outil parmi d'autres pour délimiter les AAC. Elles doivent être calées avec des observations directes (carte géologique, données de forage, etc.) pour pouvoir être interprétées. Même dans ce cas, elles peuvent s'avérer difficilement exploitables voire inutilisables pour délimiter une AAC. Dans ce cas, la méthodologie proposée en 2009 par le BRGM (Malard et al., 2009) sera appliquée : **la délimitation de l'AAC du captage étudié suivra le contour du ou des bassins versants de surface qui participent à l'alimentation des captages par infiltration des cours d'eau**. C'est ce qu'explique la partie droite du logigramme amenant à la case orange « **L'AAC sera prise égale au BV topographique** ».

Exemple de délimitation

A titre d'exemple, l'illustration 59 présente la délimitation obtenue pour l'Aire d'Alimentation d'un Captage situé en bordure de la dépression de Kaweni.

La délimitation de la zone d'appel du pompage au voisinage du forage a été effectuée à l'aide d'un outil développé sous Excel, l'outil ZAPPEL (cf. chapitre 0). Cette délimitation repose sur des hypothèses simplificatrices, que l'on peut considérer comme valides localement : l'écoulement est uniforme et unidirectionnel, et la nappe est supposée captive. Compte tenu de ces hypothèses, le calcul n'est valable qu'au voisinage du forage, en sortie de la ravine Kaouénilajoli.

La partie amont de l'AAC correspond au bassin versant topographique.

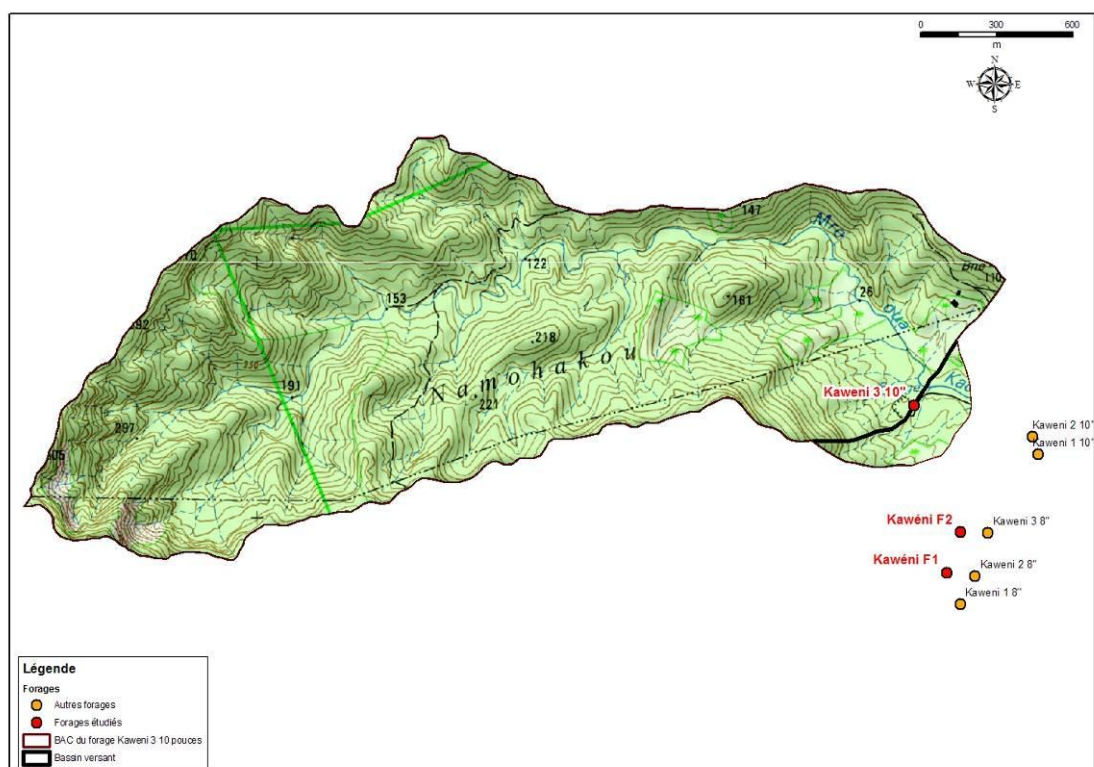


Illustration 59 - Délimitation retenue pour l'aire d'alimentation du captage Kawéni 3 10 pouces

7.2.1.2 Ile de La Réunion

Cinq aires d'alimentation de captage ont été délimitées en 2009 (cf. Illustration 60). Ils correspondent aux captages suivants :

- Captages F1 « Filaos l'Hermitage » / FRH 9 et ceux du bassin Malheur / Bassin des Aigrettes (commune de St-Paul), d'indices BSS 12265X0025, 12265X0055, 12266X0049 et 12266X0075 ;
- Forages de la Salette (communes de St-Pierre et du Tampon), d'indices BSS 12288X0045, 12288X0049 et 12288X0050 ;
- Forages Cocos 1, 2 et 3 et CGE (communes de St-Louis et de Cilaos), d'indices BSS 12288X0076, 12288X0062, 12288X0048 et 12288X0079 ;
- Forages de Sainte-Vivienne (commune de St-Suzanne), d'indices BSS 12272X0051 et 12272X0166 ;
- Source Toinette (communes de La Plaine des Palmistes et St-Benoit), d'indice BSS 12278X0001.

Les aires d'alimentation des captages prioritaires ont été délimitées en fonction des connaissances scientifiques régionales et à « dire d'expert » au cours de différentes réunions ayant eu lieu en 2009.

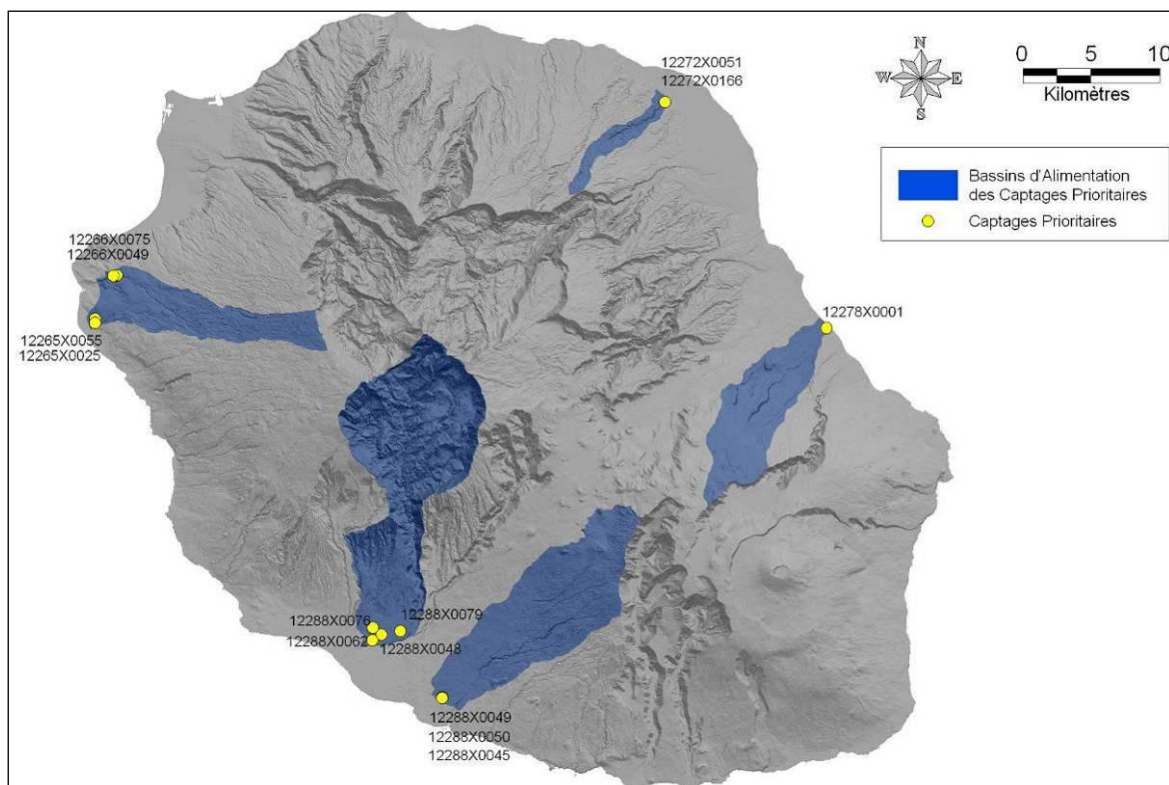


Illustration 60 - Localisation géographique des AAC et des captages prioritaires

De façon générale, il existe peu de connaissances concernant le rôle de la fracturation dans l'hydrodynamisme des formations volcaniques. En effet, la fracturation observable en surface n'est pas forcément représentative de la fracturation sous plusieurs centaines de mètres de couverture. Il est donc difficile d'adopter une méthodologie de délimitation basée sur des directions de fracturation (comme la méthode DISCO pour la cartographie de la vulnérabilité) et c'est pour cette raison qu'une approche « à dire d'expert » a été adoptée par le comité de pilotage.

A titre d'exemple, la démarche de délimitation de l'AAC de Saint-Paul (ouest de l'île) est présentée ci-dessous. Le texte est issu du comité de pilotage du 27/01/2009, statuant sur la délimitation des aires d'alimentation de captage à La Réunion et ayant réuni les « experts locaux », issus de l'Université de La Réunion, de l'Office de l'Eau, de la DAF, de la DRASS, de la DIREN et du BRGM. Les captages pour lesquels l'AAC a été délimité sont intitulés l'Ermitage, FRH9, Bassin Malheur et Bassin des Aigrettes.

L'AAC est limitée au Nord par une formation très peu perméable constituée par des brèches d'avalanche de débris. Ces dernières s'étendent de l'Îlet des Orangers dans le cirque de Mafate au cap La Houssaye.

Dans le secteur amont, la brèche est recouverte de 400 à 500 m de formations volcaniques constituées par les séries différenciées du Piton des Neiges. Dans le secteur aval, la brèche affleure et contribue, par son rôle « imperméable », aux émergences des bassins Malheur et Aigrettes de Saint-Gilles.

La limite amont (Est) de l'AAC correspond à la bordure du rempart du cirque de Mafate. D'une part, les pertes en ravin sont nombreuses et contribuent à recharger l'aquifère qui alimente les résurgences et les forages. Toutefois, ces pertes ne sont pas ponctuelles, comme cela peut

être le cas en milieu karstique, et se répartissent le long du linéaire des ravines. D'autre part, des études isotopiques récentes proposent des altitudes de recharge, pour les eaux littorales, se répartissant entre 1000 et 2000 m d'altitude.

La limite sud de l'AAC est contrainte par les travaux de Grunberger (1989) et par la connaissance hydrogéologique régionale.

Un calcul estimatif du bilan sur l'AAC délimitée a montré qu'un écart significatif subsistait entre le débit annuel des sources des différents bassins (évalué à 17 Mm³/an) et l'estimation de la recharge (2,4 Mm³/an).

Ce calcul a amené les membres du comité de pilotage à envisager une extension de la taille du bassin d'alimentation mais l'absence de connaissances hydrogéologiques complémentaires sur ce secteur de l'île n'a pas permis d'identifier une extension justifiable d'un point de vue hydrogéologique.

7.2.2 Cartographie de la vulnérabilité de l'AAC

L'approche mise en œuvre à Mayotte étant similaire à celle adoptée à La Réunion, il a été choisi de ne présenter que l'exemple réunionnais.

La caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque repose sur les deux critères suivants :

- l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) qui permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité intrinsèque des formations du sous-sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie. Cette notion d'infiltration est requise dans l'élaboration de toute carte de vulnérabilité et l'IDPR peut se substituer à plusieurs critères usuellement employés ;
- l'épaisseur de la zone non saturée : dans un milieu continu ou assimilé continu, la vulnérabilité de l'aquifère diminue avec la profondeur à laquelle il se trouve.

La carte obtenue doit être interprétée non pas en tant que reflet d'une vulnérabilité absolue mais en tant que construction d'une hiérarchie des systèmes relativement à la vulnérabilité des premières nappes rencontrées.

Dans un premier temps, le calcul de l'**IDPR** est effectué (cf. Illustration 61).

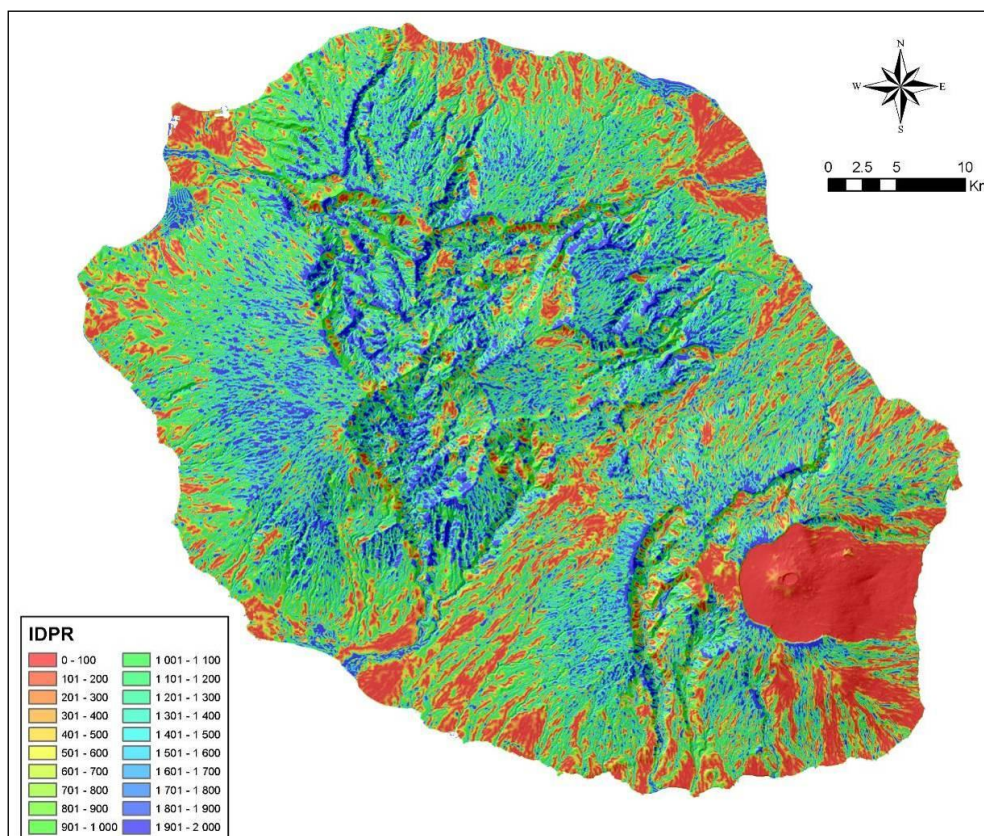


Illustration 61 - Résultat du calcul IDPR sur l'Île de la Réunion. Les zones rouges et bleues indiquent respectivement les zones majoritairement infiltrantes et ruisselantes

Afin de faciliter l'interprétation et surtout d'améliorer la représentativité des résultats maillés de l'IDPR, ceux-ci ont été affectés à des **unités fonctionnelles**. Pour ce faire, il est nécessaire de définir de petites entités cohérentes sur le plan hydrogéologique. Les travaux sur les unités aquifères d'ordre 1 de la BD-LISA n'étant pas encore totalement finalisés, ces entités homogènes ont été approchées en croisant diverses autres couches de données, à savoir :

- les principaux bassins versants de surface (issues de la BD Carthage),
- la géologie vectorisée,
- la pédologie (issues des travaux du CIRAD).

Des unités fonctionnelles cohérentes en termes morpho-pédologique et géologique sont ainsi obtenues ; elles sont présentées dans l'illustration 62.

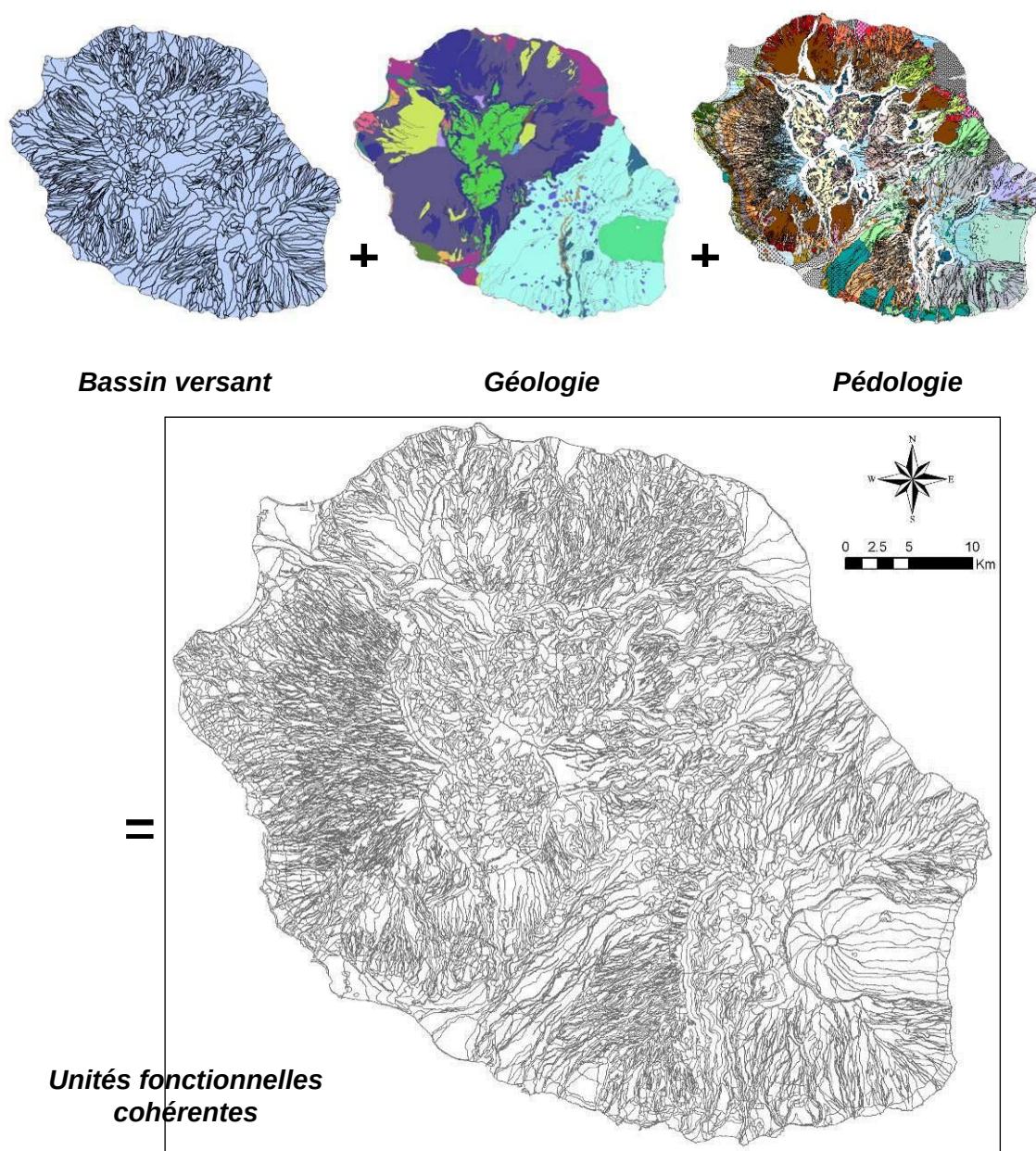


Illustration 62 - Définition des unités fonctionnelles

Le résultat de l'IPDR est ensuite affecté à chaque unité fonctionnelle ainsi créée, (médiane des valeurs IDPR des mailles présente dans chaque unité fonctionnelle). Le résultat est présenté en Illustration 63.

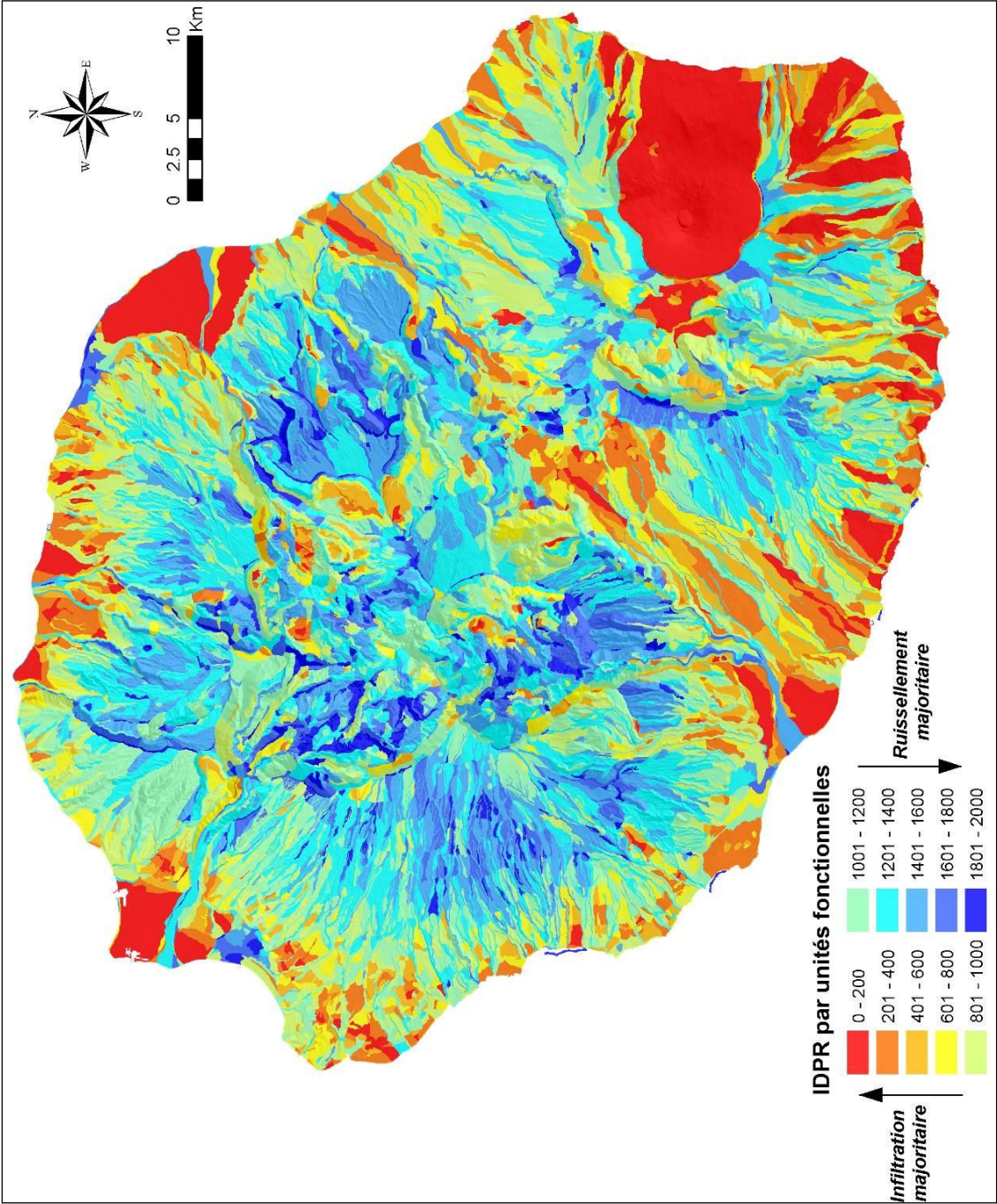


Illustration 63 : IDPR par unités fonctionnelles homogènes

A partir des valeurs IDPR obtenues par unité fonctionnelle, il est nécessaire d'élaborer un « **critère IDPR** » ramené à une échelle de valeurs comprise entre 0 et 100.

En fonction de la nature de la nappe considérée (nappe captive ou nappe libre - notamment dans les formations alluviales), une valeur donnée de l'IDPR n'a pas la même influence sur la vulnérabilité de l'aquifère.

Une pondération non linéaire du critère IDPR a ainsi été appliquée afin de prendre en compte le type de nappe : la valeur du critère affectée à l'indice IDPR (pondérée de 0 à 100) varie en fonction de la nature de la nappe (libre ou captive). Usuellement, trois occurrences sont distinguées : les nappes libres, les nappes semi-captives et les nappes captives.

Ainsi, pour une valeur du critère IDPR calculée en un lieu donné, une valeur plus forte sera affectée au critère IDPR dans le cas d'une nappe libre (soumise directement à une éventuelle pollution) et moins forte dans le cas d'une nappe captive (mieux protégée des pollutions affectant la surface).

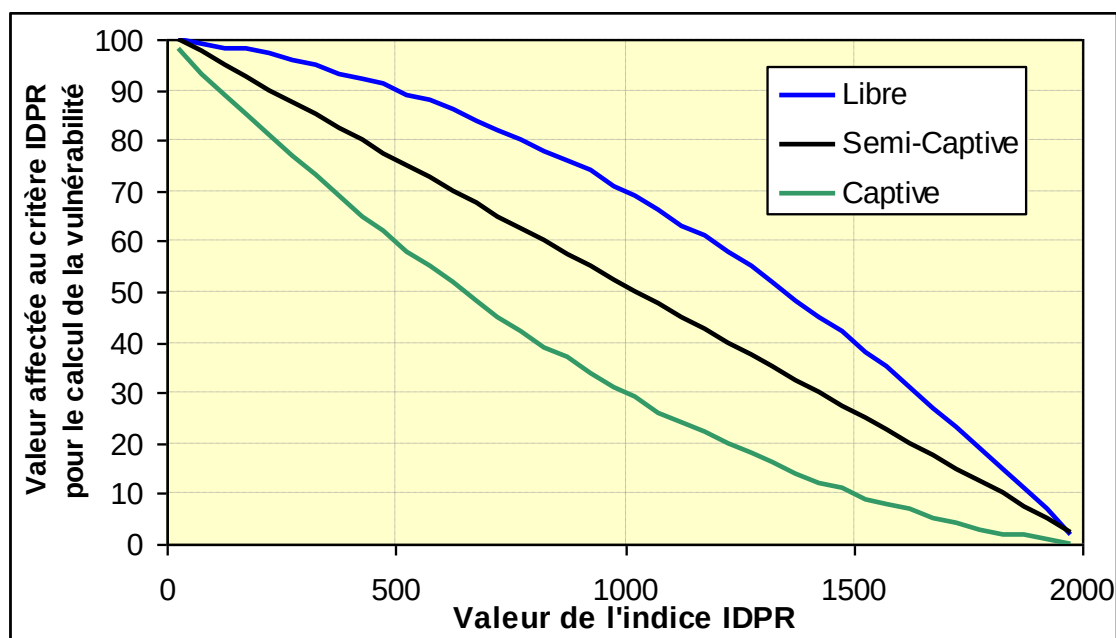


Illustration 64 - Valeurs normées du critère IDPR selon la nature de la nappe d'eau souterraine

La valeur du critère IDPR ainsi pondérée est représentée en Illustration 65.

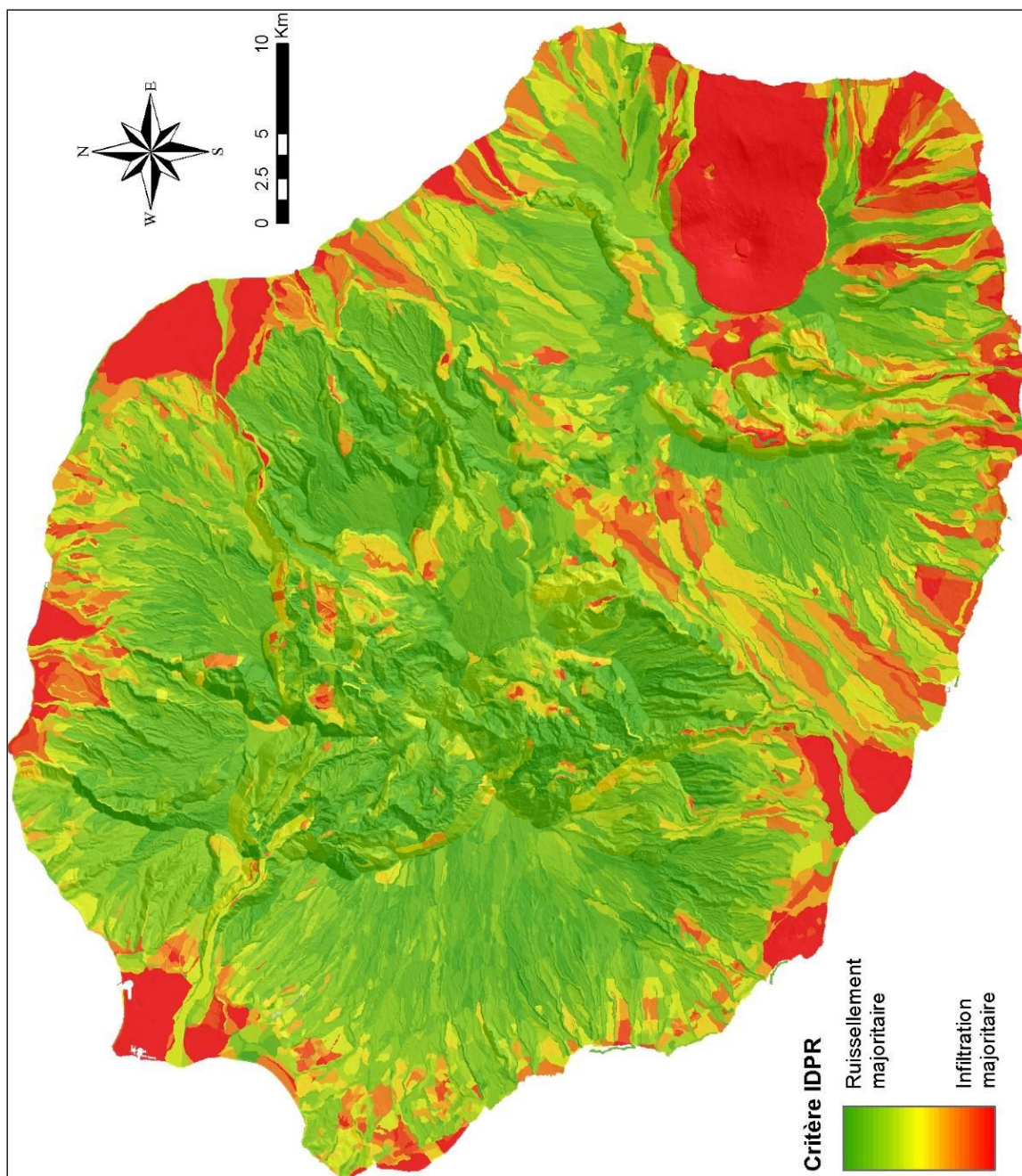


Illustration 65 : Critère IDPR affecté aux unités fonctionnelles homogènes

À La Réunion comme souvent en domaine volcanique, **l'épaisseur de la ZNS** n'est connue que dans les secteurs où des forages ont été réalisés et son interpolation, voire son extrapolation sont extrêmement délicates ailleurs, compte tenu notamment de la méconnaissance de la géométrie des réservoirs souterrains. Dès lors, le critère « Epaisseur de ZNS » tel qu'il est usuellement appliqué dans la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de métropole, ne peut pas être appliqué de la même manière dans le contexte réunionnais.

Cependant, le retard induit par la ZNS est un facteur prépondérant dans l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines, spécialement dans le contexte réunionnais où les épaisseurs de ZNS peuvent dépasser 100 m. C'est pourquoi un critère « de retard » a été défini au sein de chaque AAC, afin de pondérer le critère IDPR dans l'évaluation de la vulnérabilité. L'établissement de ce critère est basé comme suit :

- en règle générale, le gradient hydraulique apparent augmente depuis la côte (quelques ‰) vers l'intérieur des terres (quelques ‰). Une continuité hydraulique est fréquemment observée entre les aquifères côtiers et l'océan (faible différence de charge hydraulique).
- l'épaisseur de la ZNS est fonction de la topographie (cf. Illustration 66). En se basant sur une approche empirique confortée par des observations de terrains (altitude des sources des remparts notamment), le gradient hydraulique est 1,5 à 2 fois moins important que le gradient topographique (cf. écart entre les pentes des deux courbes vertes).

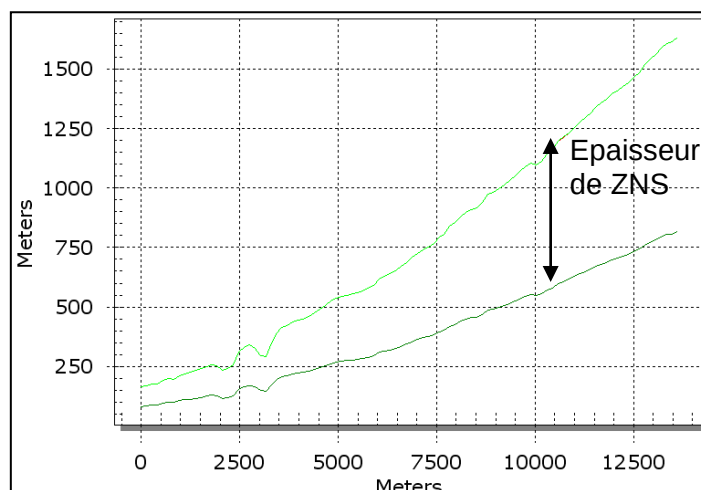


Illustration 66 - Pente topographique en vert clair et surface piézométrique en vert foncé (exemple théorique)

Au-delà de 5-6 km des côtes, l'approximation du « critère de retard » est effectuée en considérant un gradient hydraulique deux fois plus faible que le gradient topographique (cf. à titre d'exemple l'illustration 67).

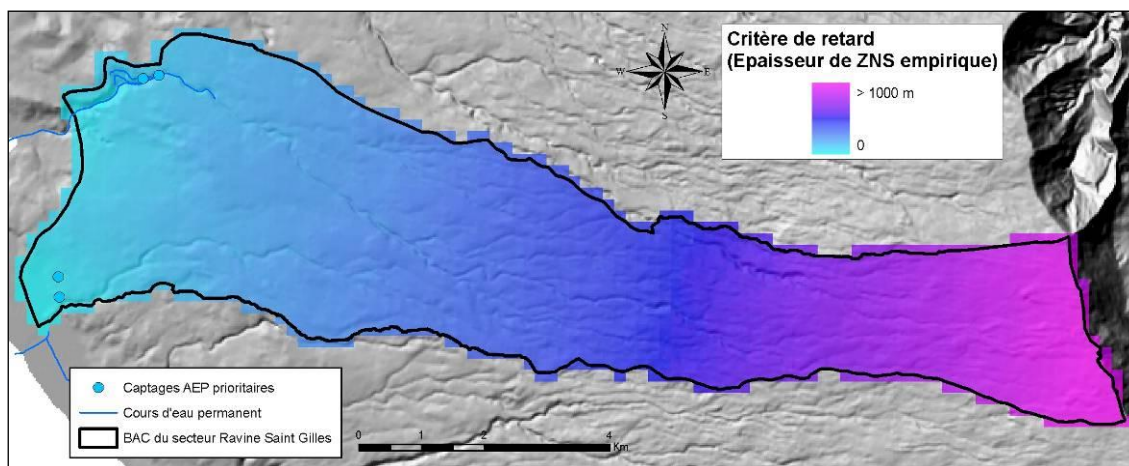


Illustration 67 - Cartographie du critère de retard (pseudo-ZNS) au sein de l'AAC de la ravine Saint-Gilles

La formule utilisée pour le **calcul de la vulnérabilité intrinsèque** des eaux souterraines est la suivante :

$$Vi = (\text{Poids IDPR} * [\text{Critère IDPR}]) + (\text{Poids ZNS} * [\text{Critère « de retard »}])$$

Avec : **Poids IDPR + Poids ZNS = 1** et **Vi compris entre 0 et 100**.

Le critère « de retard » joue un rôle d'autant plus important que l'épaisseur de la ZNS diminue et atteint des valeurs très faibles (quelques mètres seulement) : c'est le cas notamment dans les formations alluviales. Pour cette raison, le poids à donner au critère « de retard » par rapport au critère IDPR doit être plus élevé dans les plaines alluviales à nappe très peu profonde. Autrement dit, si la nappe est présente à proximité immédiate du sol (épaisseur de la ZNS < 10m), celle-ci sera considérée comme très vulnérable ($Vi = 100$).

Enfin, dans les unités fonctionnelles où les pentes moyennes dépassent 10 %, les données liées à la proximité des nappes sont peu nombreuses et difficile à discrétiser. Du coup, le poids du critère « de retard » est considéré comme négligeable et seul le critère IDPR est pris en compte. Dans le contexte réunionnais, cela permet de prendre en compte le facteur « de retard » surtout dans les zones plus planes (proches des côtes) et moins dans les zones très pentues pour lesquelles beaucoup d'inconnues subsistent.

Ailleurs, il a été choisi d'attribuer un poids plus important à l'IDPR qu'à l'épaisseur de la ZNS compte tenu des incertitudes inhérentes à l'estimation de cette dernière et à l'existence localement de tunnels de lave susceptibles de générer des percolations rapides : les poids sont respectivement de 0,75 pour l'IDPR et 0,25 pour la ZNS.

En résumé, le calcul de la vulnérabilité est effectué de la façon suivante :

- $Vi = 100$ si Critère « de retard » < 10m ;
- $Vi = \text{Critère IDPR}$ si pente > 10%.
- $Vi = 0,75 * \text{Critère IDPR} + 0,25 * \text{Critère « de retard »}$;

A titre d'exemple, l'illustration 68 présente la carte de vulnérabilité obtenue pour l'aire d'alimentation des captages de la ravine Saint-Gilles :

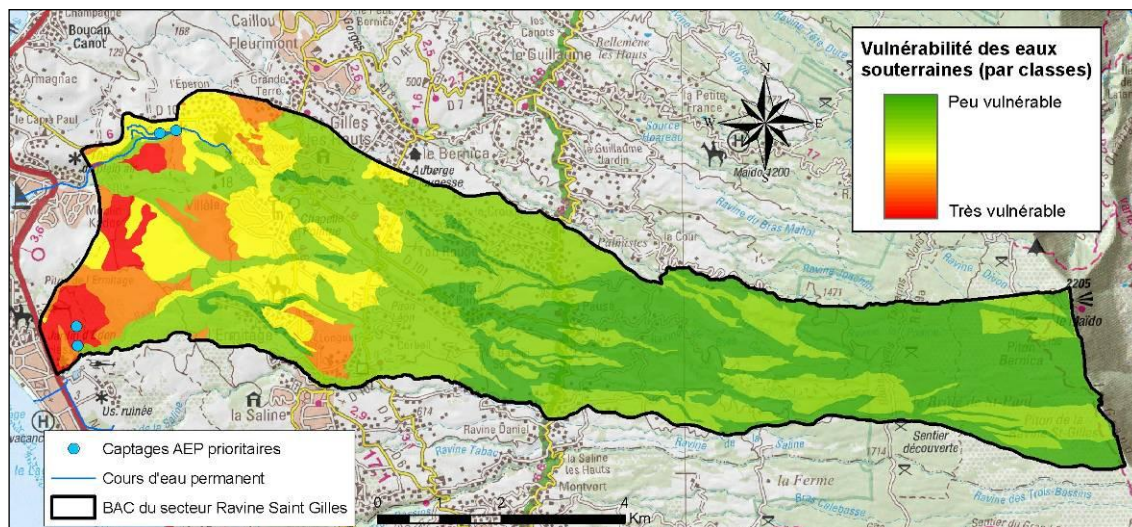


Illustration 68 : Carte de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de l'AAC du secteur de la ravine Saint-Gilles

8 Vulnérabilité spécifique vis-à-vis des pesticides

Dans le cadre de la convention ONEMA-BRGM 2011, une nouvelle approche a été développée pour évaluer la vulnérabilité spécifique d'une AAC vis-à-vis du transfert des produits phytosanitaires dans le sol et la zone non saturée (Surdyk et Vernoux, 2012). Cette approche concerne spécifiquement les captages d'eau souterraine. Elle se base sur le comportement des molécules dans l'environnement (Illustration 69) qui va essentiellement dépendre du couple DT_{50}/Koc^{13} . En effet, une molécule caractérisée par un Koc faible peut avoir un potentiel de mobilité limité si elle est aussi caractérisée par une dégradation très rapide (par exemple DT_{50} = quelques heures). La combinaison de ces deux paramètres peut, dans certains cas, permettre d'estimer un risque potentiel de lixiviation. Cependant, d'autres facteurs doivent être pris en compte pour affiner la compréhension de ces risques de transfert (doses, modes de transfert dissous/particulaire, pédologie...).

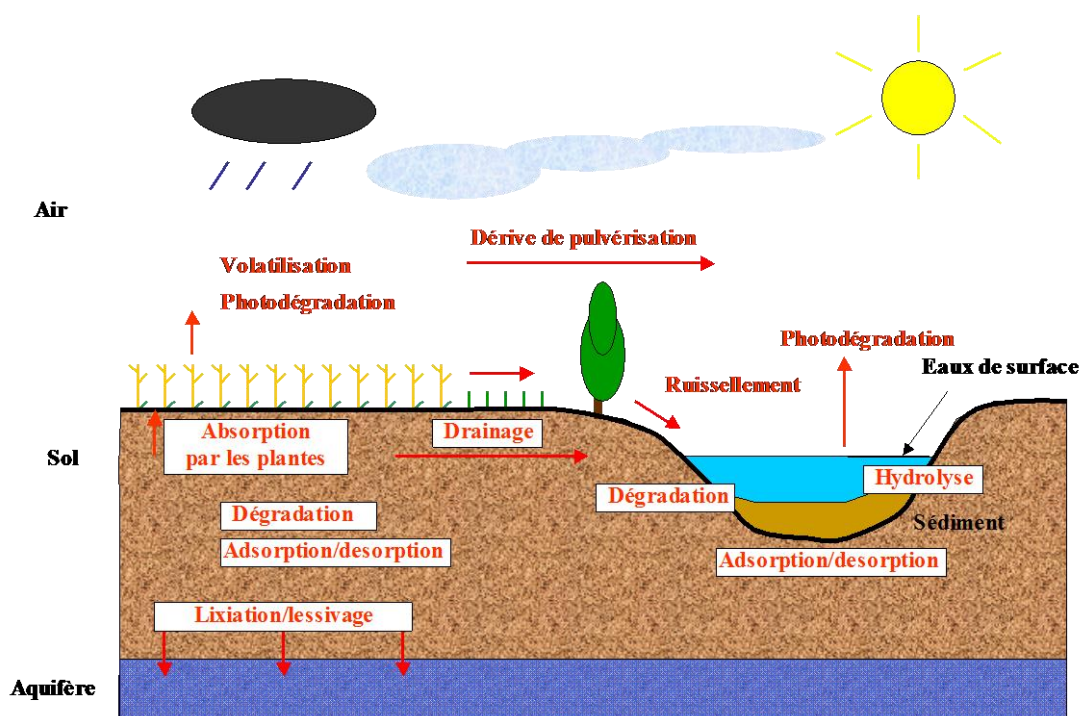


Illustration 69 - Schéma des voies de dégradation et de transfert des produits phytosanitaires

Contrairement à la méthodologie de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque élaborée sur la base de méthodologies existantes, éprouvées depuis de longues années, il s'agit ici plutôt de donner des pistes de réflexion pour le calcul de la vulnérabilité spécifique d'une aire d'alimentation de captage d'eau souterraine aux produits phytosanitaires. Ces cartes de vulnérabilité peuvent être utiles aux gestionnaires des points de captage en complément des cartes de vulnérabilité intrinsèque.

¹³ Le DT_{50} désigne le temps nécessaire pour que 50 % de la masse de la substance soit dégradée ; le Koc, ou coefficient d'adsorption au carbone organique des sols, caractérise la tendance d'une substance à être retenu par la matière organique des sols.

La mise au point d'une méthode opérationnelle d'évaluation de la vulnérabilité spécifique, s'avère néanmoins complexe car il est difficile de déterminer les paramètres de calcul. Le terme "produits phytosanitaires" rassemble des produits très divers qui recouvrent plusieurs familles chimiques, qui peuvent être utilisés au printemps comme à l'automne, seuls ou en mélange. De plus, il est difficile d'appréhender toutes les interactions entre les facteurs pouvant influencer le devenir des produits phytosanitaires. Il est donc nécessaire de souligner les difficultés liées à ce type d'étude puisque de nombreuses recherches sont en cours aussi bien sur les paramètres influençant les transferts que sur les liens entre ces paramètres.

Dans le cas présent, nous nous sommes basés sur la comparaison d'indicateurs et de modèles déjà existants pour identifier les paramètres couramment utilisés afin de simuler la mobilité des produits phytosanitaires. Les indicateurs d'évaluation du risque liés aux produits phytosanitaires les plus couramment utilisés sont GUS, EPRIP, PRI-Farm, PIRI, I-PHY, IRPeQ. Il existe également des modèles de simulation du transfert des produits phytosanitaires depuis l'application jusqu'à la nappe, mais la plupart du temps il s'agit de modèles 1D à l'échelle de la parcelle et prenant en compte uniquement les premiers mètres du sol. Il existe aussi de nombreux modèles permettant de simuler la concentration en substance sous une parcelle agricole pour un produit phytosanitaire. Ces modèles réalisent des calculs itératifs prenant en compte les effets du climat, des transferts d'eau, de la croissance des végétaux et des propriétés des produits pour simuler l'évolution des concentrations en substances. Certains modèles sont en particulier utilisés pour l'homologation des produits (MACRO, PELMO, PRZM, PEARL)¹⁴. L'utilisation de modèles n'a finalement pas été retenue pour le calcul de la vulnérabilité spécifique car ils sont jugés trop complexes à mettre en œuvre autrement que pour du cas par cas.

Pour développer une méthode de calcul de la vulnérabilité spécifique, il semble préférable de privilégier des méthodes basées sur les facteurs de retard et les facteurs d'atténuation. En effet, ces méthodes prennent en compte à la fois des paramètres « sols » et des paramètres « substances ». Il a donc semblé intéressant de baser la carte de vulnérabilité sur le calcul de la QL (Quantité Lixiviée) de l'indicateur EPRIP, moyennant quelques adaptations.

La formule pour calculer le QL (µg/l) est :

$$\text{Équation 1} \quad QL = 2,739 \times AF \times Dose \times \frac{(1 - F_{int})}{P}$$

Avec 2,739 : Un facteur de conversion d'unité
 AF : Le facteur d'atténuation
 Dose : La dose d'application du produit phytosanitaire (g/m²)
 F_{int} : L'interception foliaire (disponible dans des tables)
 P : La porosité du sol (m³/m³).

$$\text{Équation 2} \quad AF = \exp\left(-0,693 \times \frac{TR}{DT50}\right)$$

Avec DT50 : Le temps de demi-vie de la substance dans le sol (jours)
 TR : Le temps moyen de résidence dans le sol (an).

¹⁴ Pour plus de détail sur les indicateurs et les modèles, voir le rapport BRGM/RP-59656-FR (Surdyk et Vernoux, 2012)

Le temps moyen de résidence, TR, peut être calculé par la formule suivante :

$$\text{Équation 3} \quad TR = \frac{E \times RF \times \theta_{cc}}{Q}$$

Avec E : L'épaisseur du sol et de la ZNS (m)
 θ_{cc} : La capacité au champ (m^3/m^3)
 Q : La recharge (m/an)
 RF : Le facteur de Retard.

Le facteur de retard, RF, peut être calculé par l'équation suivante :

$$\text{Équation 4} \quad RF = \left[1 + \frac{\rho_d \times \frac{C_{org}}{100} \times K_{oc}}{\theta_{cc}} \right]$$

Avec RF : Facteur de Retard.
 ρ_d : La densité du sol (kg/dm^3)
 C_{org} : La teneur en carbone organique du sol (%)
 K_{oc} : Le coefficient de sorption (l/kg)
 θ_{cc} : La capacité au champ (m^3/m^3)

Les données d'entrée, sous forme de couches SIG, sont les suivantes :

- Données « sol » : taux de matière organique, capacité au champ, densité, porosité.
- Données « culture » : facteur d'interception de la culture.
- Données « sous-sol » : épaisseur de la zone non saturée.
- Données « climat » : recharge ou pluie efficace
- Données « produits phytosanitaires » : Koc, DT50, dose d'application.

L'approche proposée va naturellement conduire à une carte de vulnérabilité par produit.

La méthode a été testée sur le site de Montreuil-sur-Epte qui a fait l'objet d'un programme de recherche du BRGM et a été de ce fait instrumenté et suivi depuis la fin des années 1990. De nombreuses informations, tant pédologiques qu'hydrogéologiques, sont disponibles et ont permis d'élaborer les couches SIG des différents paramètres (Illustration 70). Les molécules étudiées sont l'atrazine et l'acétochlore.

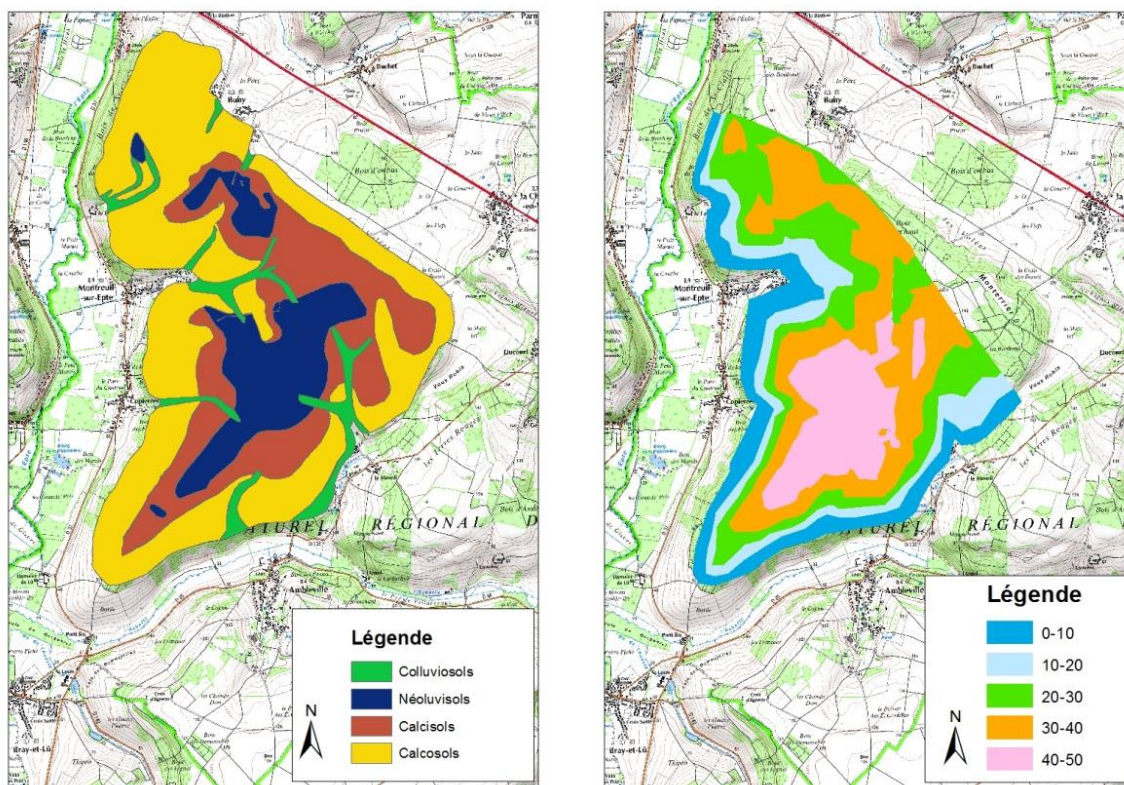


Illustration 70 - Bassin versant de Montreuil-sur-Epte : carte pédologique (à gauche) et carte d'épaisseur (m) de la ZNS (à droite) (Surdyk et Vernoux, 2012)

L'élaboration de la carte de vulnérabilité spécifique commence par la réalisation d'une carte des combinaisons "sol × épaisseur de la ZNS". Sur les 20 combinaisons possibles (4 sols x 5 épaisseurs de ZNS), seules 18 existent réellement. Par exemple, il n'y a pas de combinaison néoluvisol x 0-10 m. Pour chaque combinaison sol x sous-sol, la valeur de QL calculée a été associée. La carte des valeurs de la QL pour l'atrazine (Illustration 71) montre la double influence des sols et de l'épaisseur de la ZNS. Les zones les plus à risque sont celles issues de la combinaison "colluviosol × épaisseur 5 m", notamment parce que la faible épaisseur favorise les transferts. La carte des QL pour l'acétochlore présente moins de zones avec des valeurs de QL élevées que la carte pour l'atrazine. Cela tient essentiellement aux différences entre les valeurs de capacité de sorption des deux produits et entre celles de dégradation. En effet, l'acétochlore s'adsorbe mieux sur la matière organique et se dégrade plus rapidement que l'atrazine.

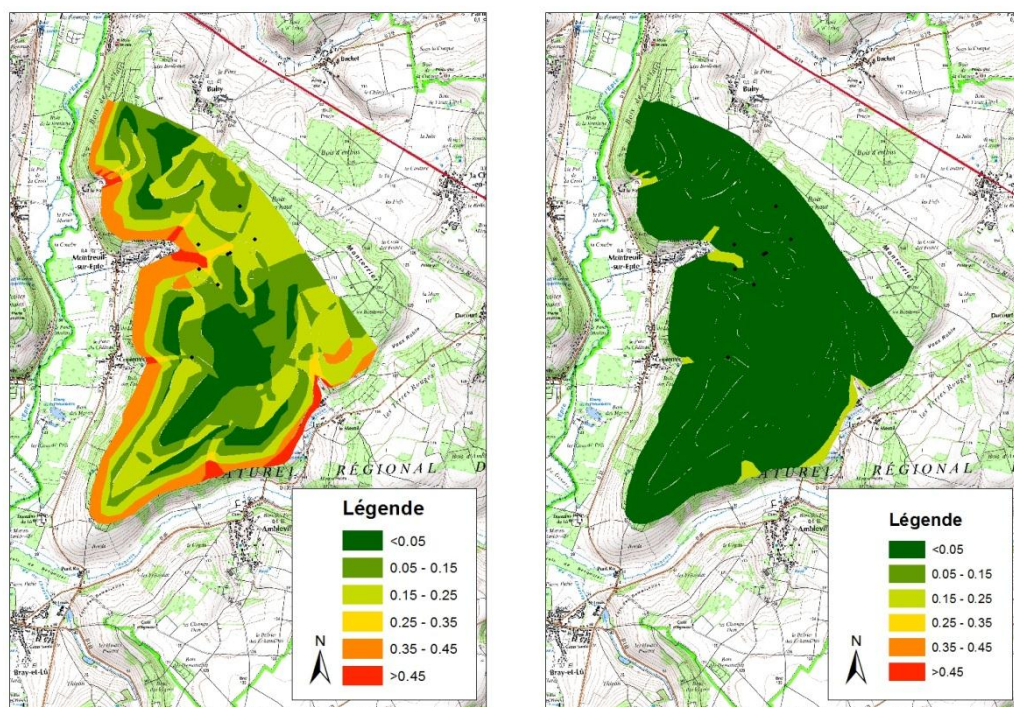


Illustration 71 - Carte des valeurs de la QL pour l'atrazine (à gauche) et l'acétochlore (à droite) sur le bassin versant de Montreuil-sur-Epte.

Les premiers résultats obtenus sont encourageants mais il faut également évoquer les limites de la méthode basée sur des valeurs de Koc et DT50 qui vont la plupart du temps être récupérées dans des bases de données alors qu'elles sont dépendantes de la zone d'étude. Il semble néanmoins peu réaliste de faire des mesures de Koc et de DT50, vu l'incertitude sur ce type de mesure et le grand nombre de combinaisons sol/produit phytosanitaire qui peut être observé sur une AAC. De même l'utilisation de fonctions de pédo-transfert pour certains paramètres (densité, porosité et capacité au champ dans le cas de Montreuil-sur-Epte) peut aboutir à une dégradation de la qualité des résultats.

On peut également envisager le couplage de la vulnérabilité intrinsèque et de la vulnérabilité spécifique, ce qui n'a pas été fait dans l'exemple présenté. Ce couplage nécessite quelques adaptations, pour éviter la redondance de paramètres tels que l'épaisseur de la zone non-saturée et la pluie efficace.

9 Conclusion

La mise en œuvre des méthodes de délimitation d'une aire d'alimentation de captage et de cartographie de sa vulnérabilité, nécessite d'avoir au préalable caractérisé du point de vue hydrogéologique le système associé au captage d'eau potable. L'aire d'alimentation doit être délimitée à partir des connaissances géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques.

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

Les méthodes de caractérisation de la vulnérabilité proposées dans ce guide sont basées sur des méthodes existantes, impliquant comme pour tout guide de ce type une nécessaire simplification de la réalité. Il convient néanmoins d'insister sur le caractère empirique de la définition des paramètres de vulnérabilité, qui peuvent de ce fait être soumis à discussion.

La mise à jour du guide a essentiellement été basée sur un retour d'expérience sur les études de délimitation et de cartographie de la vulnérabilité des captages « Grenelle » d'eau souterraine (Vernoux et al., 2011). L'analyse des études disponibles a permis de mettre l'accent sur deux aspects essentiels :

- le besoin en termes de données par rapport à l'objectif de l'étude ;
- les problèmes de mise en œuvre de la méthodologie.

La réalisation d'une étude de délimitation et de cartographie de la vulnérabilité demande au préalable un certain nombre de données, dont la qualité, l'exhaustivité et la répartition spatiale et/ou temporelle conditionneront la précision des résultats. Par exemple, le niveau de précision des données sur la piézométrie impactera très fortement le tracé du contour de l'AAC et la cartographie de la vulnérabilité (à travers le critère de l'épaisseur de la zone non saturée). Les données relatives à la pédologie, au drainage des parcelles ou à la localisation des exutoires peuvent aussi s'avérer essentielles lors des études de vulnérabilité mais n'étaient pas suffisamment mises en avant dans le guide méthodologique ; par ailleurs, elles sont souvent difficiles à acquérir et nécessitent des investigations qui vont augmenter le coût de l'étude.

De plus, les données doivent être cohérentes avec l'échelle de l'AAC. Lorsqu'elles ne le sont pas (données pédologiques au 1/1.000.000^e pour une AAC de quelques kilomètres carrés par exemple), de nouvelles campagnes d'acquisition doivent être réalisées. D'autre part, la nécessité d'affiner la connaissance hydrogéologique et notamment celle des écoulements souterrains lorsque le contexte hydrogéologique est assez complexe, peut requérir, dans certains cas, l'utilisation d'un modèle maillé. Même si là encore, la mise en œuvre d'un tel outil va augmenter le coût de l'étude, les bénéfices attendus sont importants : délimitation précise de l'AAC, possibilité d'identifier les zones contributives à l'alimentation du captage, possibilité de simuler des scénarios de réduction des nitrates et de délimiter des zones d'actions pertinentes pour la protection des captages.

Concernant la mise en œuvre de la méthodologie proposée dans la première version du guide, un certain nombre de problèmes ont été soulevés, notamment pour les aquifères karstiques et pour ceux dont l'alimentation est mixte (eau souterraine - eau de surface). Pour ces contextes, il est apparu que des données spécifiques (essais de traçage, pompages d'essais...) étaient le plus souvent requises mais insuffisamment disponibles. Pour le second cas, la connaissance des relations nappe/rivière pouvait permettre de mieux délimiter le bassin. D'autre part, des problèmes de cohérence des délimitations et des cartographies de vulnérabilité pour des AAC contigües ont souligné l'importance d'utiliser une méthodologie commune, des données équivalentes et d'avoir une approche concertée. Il apparaît évident que des cartes de vulnérabilité de deux AAC adjacentes réalisées par des bureaux d'étude différents doivent être compatibles entre elles sous peine de remettre en cause l'acceptation des plans d'action de lutte contre les pollutions diffuses sur ces AAC.

10 Sources de données

Nature de la donnée	Echelle	Origine	Remarques
MNT (grille SIG)	pas de 50 m	BD ALTI (IGN) www.ign.fr	Permet de générer une grille de pente
Carte pédologique	variée	INRA http://gissol.orleans.inra.fr/actualite/publications.php	Descriptif des unités de sol ; Couverture incomplète
Référentiel Régional Pédologique (base de données cartographique)		INRA : Programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols du GIS Sol http://gissol.orleans.inra.fr/gissol/gissol.php	Chaque UTS est caractérisée par des données descriptives (texture, hydromorphie, nature du matériau d'origine, profondeur d'apparition du substrat...).
Base de données d'analyses de terre	Cantonale	INRA http://www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php	données statistiques à l'échelle cantonale : texture, MO, indice de battance...
Carte géologique	1/50.000	BRGM http://infoterre.brgm.fr/	
Carte piézométrique	Variable	Variée ; voir en particulier les SIGES Exemple : http://sigescen.brgm.fr/Cartes-piezometriques,240.html	A rechercher localement. Il en existe de nombreuses (HE, BE, ME), sous des formats polygones, parfois grilles
IDPR	1/50.000	BRGM http://infoterre.brgm.fr/	Fournit le rapport infiltration / ruissellement ; disponible sur l'ensemble de la France
BD Carthage (référentiel hydrographique)	1/50.000	IGN http://professionnels.ign.fr/bdcarthage	Disponible sur l'ensemble de la France

BD-LISA (Base de Données sur le Référentiel Hydrogéologique Français)		BRGM http://www.eaufrance.fr/breve/bdlisa-un-nouveau-referentiel	
Précipitations AURELHY (grille SIG)	pas de 1 km	METEO-FRANCE www.meteofrance.fr	Moyenne annuelle de référence 1981–2010 des précipitations
Précipitations efficaces (grille)	pas de 12 km	METEO-FRANCE www.meteofrance.fr	Les précipitations efficaces sont évaluées à l'aide de la chaîne SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU)
Précipitations, ETP	données ponctuelles	METEO-FRANCE http://climatheque.meteo.fr/aide/climatheque/reseauPostes/	Données issues du réseau des stations météorologiques
ADES (Banque de données sur les eaux souterraines)	données ponctuelles	Diverse (BRGM, DIREN, collectivités, DDASS, agences de l'eau, ...) http://www.ades.eaufrance.fr/	Données des réseaux de suivi quantitatifs et qualitatifs des eaux souterraines
Banque HYDRO	données ponctuelles	MEDAD www.hydro.eaufrance.fr/	Données des réseaux de suivi de débits des rivières et des sources
Données géologiques et hydrogéologiques	données ponctuelles	BRGM http://infoterre.brgm.fr/	Données issues de la BSS
BD Cavité	données ponctuelles	BRGM http://www.bdcavite.net/	Localisation des cavités d'origine anthropique ou naturelle en France

11 Boîte à outils

11.1 OUTILS DE CARTOGRAPHIE

Parmi les systèmes d'information géographique (SIG) existant sur le marché, on peut citer par exemple ArcGIS (ESRI ©), Mapinfo ou QuantumGIS (QGIS). Tous les trois disposent de modules dédiés à la manipulation des grilles raster : il s'agit par exemple, respectivement de « Spatial Analyst », « Vertical Mapper » ou de l'extension GdalTools.

ArcGIS propose des utilitaires accessibles gratuitement sur internet (<http://support.esri.com/>) :

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

11.2 OUTILS DE MODELISATION ET DE DELIMITATION DE LA PORTION DE NAPPE ALIMENTANT LE CAPTAGE

Logiciel ASMWIN (Aquifer Simulation Model for Windows) : logiciel maillé gratuit, ASMWIN a été développé par W. Kinzelbach et R. Rausch. Il est téléchargeable sur le site de l'ETH (Institut Fédéral de Technologie) de Zürich

<http://www.ifu.ethz.ch/publications/software/asmwin>.

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

Logiciel MARTHE : développé par le BRGM, destiné à modéliser les problèmes d'écoulement rencontrés dans des contextes variés. Une version gratuite limitée en nombre de maille (3 couches de 900 mailles chacune), mais suffisante pour traiter de nombreuses AAC peut être demandée à l'auteur (marthe@brgm.fr) et devrait être prochainement proposée en téléchargement libre.

<http://www.brgm.fr/logiciel.jsp>

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

Outil ZAPPEL : pour la détermination de la zone d'appel et des isochrones, il sera mis en ligne prochainement sur les sites <http://www.brgm.fr/logiciel.jsp> et <http://infoterre.brgm.fr/>

Une version sous Excel de cet outil est disponible sur simple demande jf.vernoux@brgm.fr

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

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

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

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

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

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

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

Les données à fournir par l'utilisateur sont:

- les bornes mini et maxi de la transmissivité
- le gradient hydraulique en régime naturel ;
- la valeur du débit de pompage (en m³/h);
- l'angle fait par l'écoulement régional avec un axe Est-Ouest;
- les coordonnées cartésiennes métriques du captage d'eau potable;
- le coefficient de dispersion pris en compte;
- les angles θ pour lesquels les coordonnées des points des courbes enveloppes sont calculées (6 par run).

Le calcul des valeurs est effectué automatiquement.

11.3 OUTILS DE CALCUL DU BILAN HYDROLOGIQUE

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

12 Bibliographie

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.

ANTEA, GINGER, CALLIGEE (2009) – Délimitation des aires d'alimentation des captages prioritaires du bassin Adour Garonne. Phase 2 : Investigations complémentaires et délimitation des aires d'alimentation de captages. Forages de Bordes-Angaïs F3 et F4. 10306X0034/F3 et 10306X0035/F4. Commune de Bordes (64). Rapport du 27 novembre 2009. 58 pages, 21 fig., 7 tab.

Aunay B., Brugeron A., Vaudour K., Wuilleumier A. (2010) - Détermination de la vulnérabilité, des pressions et des risques de pollution sur cinq Bassins d'Alimentation de Captage prioritaires à l'île de la Réunion. Rapport BRGM RP-59057-FR

Aunay B., Brugeron A., Vaudour K., Wuilleumier A. (2010) - Détermination de la vulnérabilité, des pressions et des risques de pollution sur cinq Bassins d'Alimentation de Captage prioritaires à l'île de la Réunion. Rapport BRGM RP-59057-FR, à paraître

Banton O. et Bangoy L. (1999) – Hydrogéologie, Multiscience environnementale des eaux souterraines.

Barthelemy Y., Seguin J.-J. (2013). Modélisation maillée des écoulements souterrains. Principes, démarche et recommandations. Rapport BRGM RP-62549-FR.

Bellier S. (2013) - Modélisation de la contamination nitrique de la nappe des calcaires de Champigny. Application à la protection des captages prioritaires de la fosse de Melun et de la basse vallée de l'Yerres, thèse de l'ENSMP, nov. 2013.

Boudet M. avec la collaboration de Wuilleumier A. (2013) – Délimitation des aires d'alimentation de Moulton et Blainville-sur-Orne, Calvados, Basse-Normandie. Rapport BRGM/RP-62754-FR. 27 p., 14 ill., 2 annexes.

Bourlier P.Y., Lachassagne P., Desprats J.F., Gilles C. (2005) – Nouveaux éléments sur la structure et le fonctionnement hydrogéologique du plateau basaltique de l'Aubrac (Massif Central, France). Première évaluation des potentialités en eau souterraine, Comptes rendus Geoscience, pp. 663-673

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.

Castillo C., Jaouen T., Vernoux J.F. (2013) – Actualisation de la méthodologie de délimitation des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine de Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-62709-FR, 80 p. 46 ill., 1 ann.

Catalogne C. (2013) – Guide pour la délimitation et la cartographie de vulnérabilité intrinsèque d'Aires d'Alimentation de Captages à transferts mixtes. Rapport irstea.

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

Custodio, E., (1978). Geohidrologia de terrenos e islas volcanicas. Instituto de hidrologia. Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid, Spain. (Publ. no. 128, 303 pp.)

Custodio, E., (1989). Groundwater characteristics and problems in volcanic rock terrains. Isotopic Techniques in the Study of the Hydrology of Fractures and Fissured Rocks. IAEA, Vienna, pp. 87–137.

Dörfliger N. (2010). Guide méthodologique – les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de P. Crochet, N. Jozja, B. Marsaud, P-H. Mondain, P. Muet, V. Plagnes. BRGM RP-58237-FR, 246 pp.

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 39(2): 165–176.

Dörfliger N., Plagnes V. (2009). Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques : guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Rapport BRGM RP-57527-FR, BRGM, Orleans, France, 100 pp.

Dörfliger N., Plagnes V., Kavouri K., Balayre S., Paris C., Muet P., Subias C., Jaunat J., Huneau F., Prévost V., Marchet P., Gouin J. (2009b). PaPRIKa, une méthode multicritère de cartographie de la vulnérabilité pour une gestion des ressources et des captages en milieu karstique : exemples d'application dans le Sud-Ouest de la France. Géologues 163: 86–92.

El Hakim M., Bakalowicz M. (2007). Significance and origin of very large regulating power of some karst aquifers in the Middle East: implication on karst aquifer classification. Journal of Hydrology 333 (2–4): 329–339.

Fleury P., Plagnes V., Bakalowicz M. (2007). Modelling of the functioning of karst aquifers and flow-rate simulation: Fontaine de Vaucluse. Journal of Hydrology 345 : 38–49.

Foster S., Hirata R., Andreo B. (2013) - The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? Hydrogeology Journal 21: 1389–1392

Gilli E. (2011). Karstologie - Karsts, grottes et sources: Karsts, grottes et sources. Dunod Ed : 251 p.

Gilli E., Mangan C., Mudry J. 2012. Hydrogéologie : objets, méthodes, applications. 3^{ème} édition, Dunod Ed : 352 p.

Join J-L., Folio J-L., Robineau B. (2005) - Aquifers and groundwater within active shield volcanoes. Evolution of conceptual models in the Piton de la Fournaise volcano. Journal of Volcanology and Geothermal Research 147 (2005) 187– 201.

Jourdain T, Maurillo .N., Mouron R. (2002) – Approche géologique et hydrogéologique des ensembles volcaniques de Grande-Terre (Ile de Mayotte). Rapport BRGM RP-52193-FR, 80 p., 17 fig., 8 tab., 5 ann.

Kavouri K., Plagnes V., Tremoulet J., Dörfliger N., Rejiba F., Marchet P. (2011). PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability - application to the Ouyse karst system (southwest France). Hydrogeology Journal 19: 339–353.

Le Henaff G., Gauroy C. (2012). Délimitation des aires d'alimentation de captages en eaux de surface et caractérisation de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions agricoles diffuses par les pesticides – Guide méthodologique. Rapport Irstea-MEEDDM/MAAF, 55 pp.

MacDonald G.A., Abbott, A., Peterson, F., (1983). *Volcanoes in the Sea, the Geology of Hawaii*. University of Hawaii Press. 517 pp.

Malard A. avec la collaboration de B. Aunay, J.F. Vernoux et V. Mardhel (2009) – Définition d'une méthodologie commune aux études des bassins d'alimentation de captages à Mayotte. Principes de délimitation des bassins et de caractérisation de la vulnérabilité des captages - BRGM/RP-57299-FR, 146 p., 34 ill., 12 tab., 5 eq, 6 ann.

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

Mangin A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse, Université Dijon, France, 124 p.

Maréchal J-C., Lachassagne P. (2004) – Réduction de l'effet de serre par séquestration géologique minérale *in situ* de CO₂ au sein de roches basiques. Synthèse bibliographique et revue des potentialités en France. Rapport final. BRGM RP-53474-FR, 51 p., 17 fig., 7 tab.

Marsaud B. (1997). Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse de doctorat, Université d'Orsay Paris XI. Documents du BRGM no 268.

Mudry J. (1987). Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Franche-Comté, Annales Scientifiques, Géologie, Mémoire H.S. : 381 p.

Muet P., Vier E. (2011). Stratégie de protection des ressources karstiques utilisées pour l'eau potable – guide pratique. Guide technique réalisé par GINGER Environnement sous le pilotage de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne : 80 pp.

Muet P., Vier E., Cadilhac L., Marchet P. (2006). Bilan et analyse de la mise en œuvre des périmètres de protection des captages AEP en milieu karstique. Synthèse de préconisations en faveur de l'amélioration des démarches de protection. Rapport Agences de l'Eau RMC et AG, GINGER Environnement : 28 pp.

Nehlig P., Boivin P., de Goër A., Mergoïl J., Prouteau G., Sustrac G., Thiéblemont D. (2003) – Les volcans du Massif Central. *Revue Géologues*. Numéro spécial : Massif Central.

Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279 : 275–289.

Perrin J., Jeannin P.Y., Zwahlen F. (2003b). Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. *Journal of Hydrology* 279: 106-124.

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

Peterson F.L. (1972) - Water development on tropical volcanic islands, type example: Hawaii. *Ground Water* 5, 18– 23.

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

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

Quesnel F. (1997) - Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. (Thèse, document BRGM n°263)

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

Roux JC. (sous la coordination de) (2006) - Aquifères et Eaux souterraines en France.

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>

Thiéry D. (2003). Le logiciel GARDENIA, version 6.0. Guide d'utilisation. Rapport BRGM RP-52832-FR : 102 p.

Vaudour K., Aunay B. (2008) – Modalités de captage des eaux souterraines à La Réunion. Analyse critique de l'existant (techniques, coûts, opérateurs) - BRGM/RP-56787-FR, 87 p., 44 ill., 5 ann.

Vernoux J.F., Barrez F., Wuilleumier A. (2011) - Analyse des études de délimitation et de vulnérabilité des aires d'alimentation des captages « Grenelle », rapport BRGM/RP-59583-FR.

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2007) - Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. guide méthodologique, rapport BRGM/RP-55874-FR.

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

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

Vernoux J.F., Buscarlet E., Gourcy L., Wuilleumier A. (2010) - Champs captant de Montreuil-sur-Eure et Vert-en-Drouais (28) : délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables, rapport final – rapport BRGM/RP-58587-FR

Vernoux J.F., Gutierrez A., Wuilleumier A. (2012) - Champs captant de Montreuil et Vert-en-Drouais (28) : Mise à jour de la carte de vulnérabilité et propositions d'investigations complémentaires, rapport final – rapport BRGM/RP-61199-FR, 51 pages, 22 figures, 3 tableaux.

Williams P.W. (2008). The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. International Journal of Speleology 37(1) : 1-10.

Zwahlen F. (2004). COST Action 620 : vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) Aquifers. Final report, European Water Framework Directive, European Commission, Brussels, 297 pp.

13 Glossaire

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

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

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

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

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

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

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

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

Faïlles : fentes et fissures dans les roches dures.

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

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

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

Karstification : processus particulier d'érosion commandées par la dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies). L'eau de pluie s'infiltré dans le sol où elle acquiert de l'acidité nécessaire à la mise en solution de la roche en se chargeant en CO₂.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Hydrogéologie des milieux volcaniques :

Brèche volcanique : brèche à ciment de cendres et lapillis, et à fragments de roches magmatiques volcaniques, avec parfois des débris des roches encaissantes.

Cendres : fragments de roche effusive (c'est-à-dire des éléments pyroclastiques) projetés par les volcans, de taille inférieure à 2 mm.

Coulée « aa » : coulée de lave dont la surface, qui s'est solidifiée et brisée durant la descente, est déchiquetée et scoriacée.

Diagénèse : ensemble des processus qui affectent un dépôt sédimentaire et le transforment progressivement en roche sédimentaire solide.

Dyke : lame épaisse de quelques dizaines ou quelques centaines de mètres de roche magmatique recoupant les structures de l'encaissant.

Filon : lame de roche, épaisse de quelques centimètres à quelques mètres, recoupant les structures de l'encaissant. Un filon correspond le plus souvent au remplissage d'une fracture et est constitué soit de roches magmatiques, soit de roches dont le matériel, souvent enrichi en substances utiles, provient de roches magmatiques ou de l'encaissant et a été déplacé par des fluides aqueux.

Hyaloclastite : Brèche fine à éléments de verre volcanique, associée aux laves en coussin (pillow-lava).

Ignimbrite : roche formée par l'accumulation de débris de laves acides (rhyolites, dacites) soudés à chaud, à aspect de ponce ou de lave un peu fluidale.

Lahar : coulée boueuse à débris de roches volcaniques de toutes tailles, et qui affecte fréquemment les pentes raides et mal consolidées des volcans.

Lapillis : fragment de lave projeté par les volcans, à surface scoriacée ou non, et dont la taille est comprise entre 2 et 30 mm, ou entre 2 et 64 mm selon la classification granulométrique retenue.

Roche pyroclastique : désigne un ensemble de roches (cendres, lapillis, ignimbrites, tufs...) résultant de l'accumulation de débris de roches magmatiques éjectés par les volcans.

Roche acide : roche magmatique contenant 66% ou plus en poids de SiO₂, d'où en général présence de cristaux de quartz, et riches en Mg, Fe et Ca (15% ou moins).

Roche basique : roche magmatique pauvre en SiO₂ (45 à 52% en poids), d'où absence de cristaux de quartz, et pauvres en Mg, Fe et Ca (de 20 à 35%).

Scorie : fragment de lave vacuolaire et, par suite, de faible densité, à surface irrégulièrement poreuse, hérissée d'arêtes et de pointes, apparaissant dans les projections volcaniques ou sur des coulées dont la surface est craquelée.

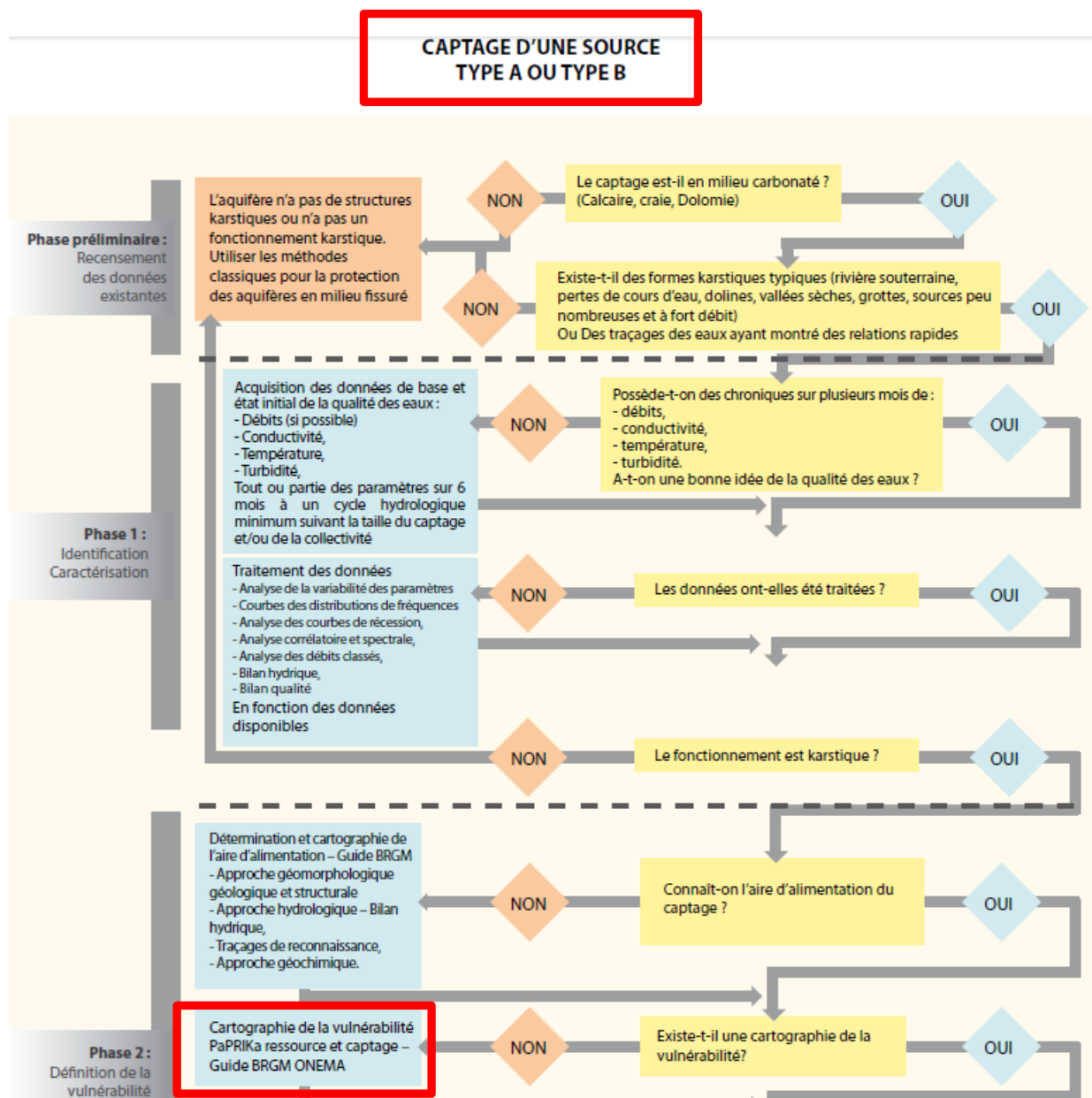
Sill : lame de roche magmatique intrusive parallèle à la structure de l'encaissant. L'épaisseur varie du mètre à quelques dizaines de mètres et la longueur peut atteindre plusieurs kilomètres.

Tuf : roche formée par l'accumulation de projections volcaniques en fragments de quelques millimètres, pouvant contenir des blocs ou des cendres, et consolidée sous l'action de l'eau.

Verre volcanique : magma ayant refroidi très rapidement, sans cristalliser, donnant des laves qui ont en général un éclat gras, une teinte souvent foncée et une cassure conchoïdale (comme par exemple l'obsidienne). Dans de nombreuses roches magmatiques effusives, le verre existe en proportion variable, comme matrice englobant les cristaux.

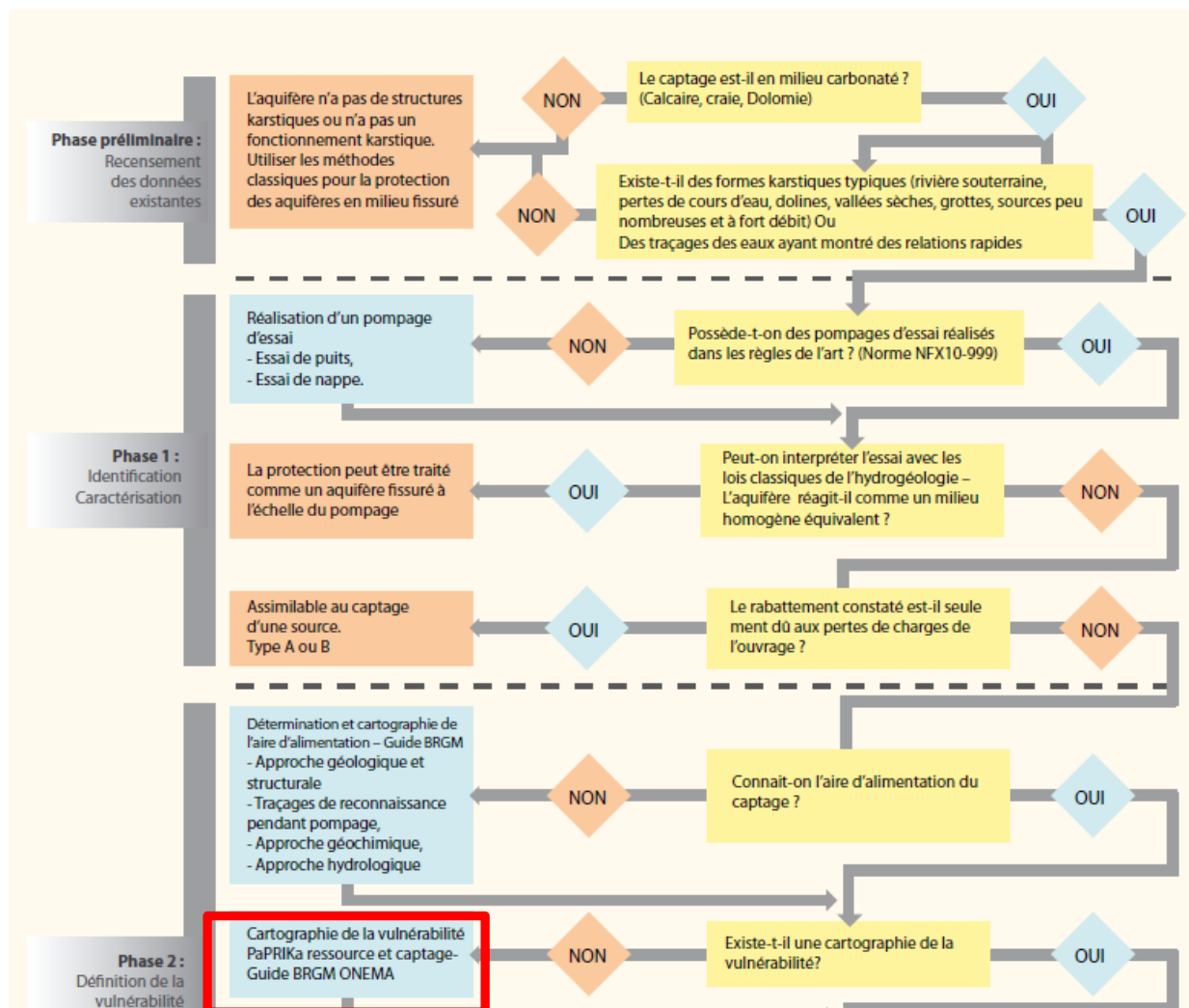
Annexe 1

Logigrammes permettant de définir la nécessité de mise en œuvre d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité propre aux aquifères karstiques



D'après Muet & Vier (2011)

**CAPTAGE PAR FORAGE
TYPE C**



D'après Muet & Vier (2011)



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement & Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34