



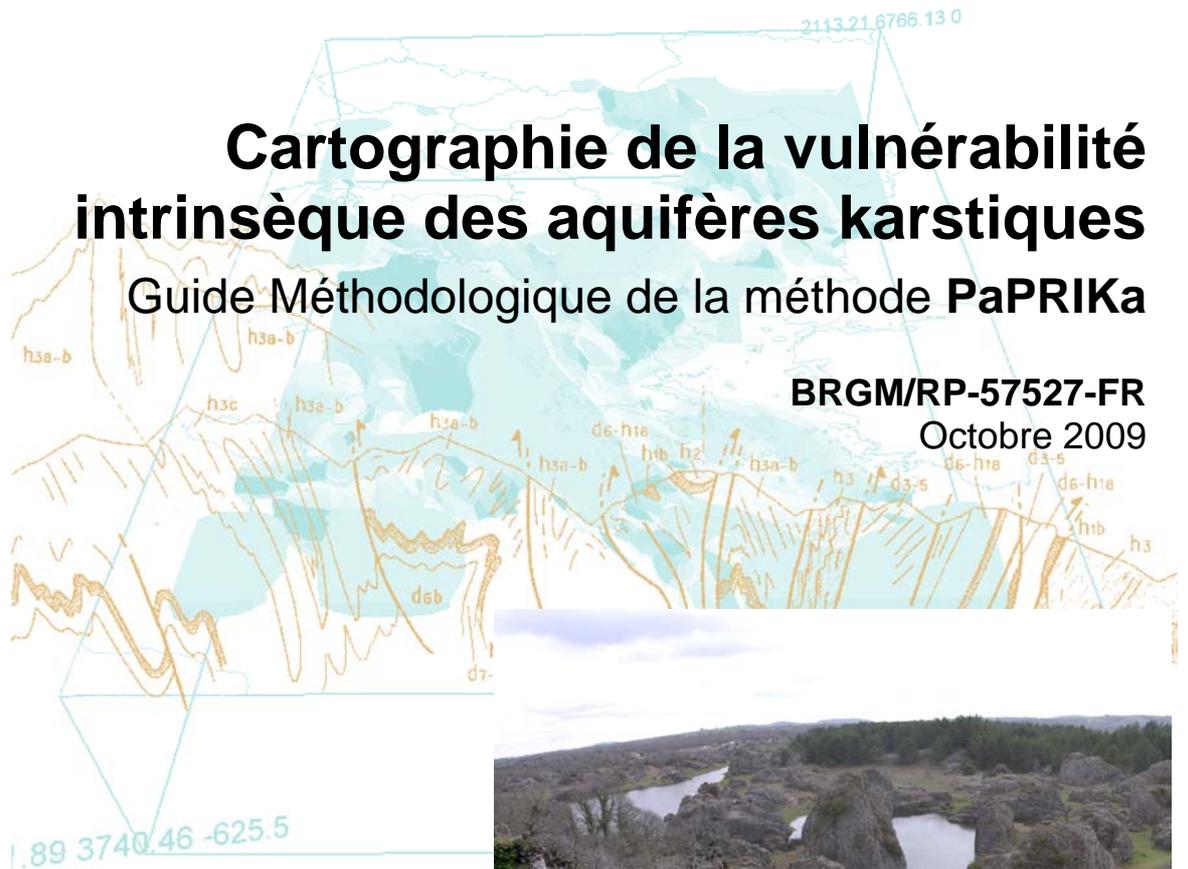
Document public

Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques

Guide Méthodologique de la méthode PaPRIKa

BRGM/RP-57527-FR

Octobre 2009



Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques

Guide méthodologique de la méthode **PaPRIKa**

BRGM/RP-57527-FR

Octobre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2008-2009 Conventions ONEMA-BRGM

N.Dörfliger, V. Plagnes

Avec la collaboration de K. Kavouri et J.Gouin

Vérificateur :

Nom : Jean-François Vernoux

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : Didier Pennequin

Date :

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 :2000.

Mots clés : PaPRIKa, vulnérabilité intrinsèque, système karstique, Bassin d’Alimentation de Captage, périmètres de protection

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

Dörfliger N., Plagnes V. (2009) : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Avec la collaboration de K. Kavouri et J. Gouin ; BRGM RP- 57527-FR, 105pp., 55 ill., 4 ann.

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l’autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La méthode **PaPRIKa** qui fait l'objet de ce guide méthodologique, est un outil de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères et des systèmes karstiques dans un but, soit de caractériser la vulnérabilité du captage (source, forage) en vue de délimiter des périmètres de protection, soit de caractériser la vulnérabilité des bassins d'alimentation des captages dans une démarche de protection prioritaire des captages vis-à-vis des pollutions diffuses. Cette méthode résulte de la prise en compte d'évolutions de la méthode EPIK, première méthode dédiée aux aquifères karstiques comme point de départ ainsi que les nombreux développements qui ont eu lieu au niveau européen au cours de la dernière décennie. Ce guide méthodologique a été rédigé dans le cadre des actions menées par le BRGM pour l'ONEMA.

PaPRIKa dont l'acronyme signifie « **P**rotection des **a**quifères karstiques basée sur la **P**rotection, le **R**éservoir, l'**I**nfiltration et le degré de **K**arstification », est une **méthode multicritère à index avec système de pondération** dont les critères sont sélectionnés en fonction des caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques.

Ce guide est destiné aux hydrogéologues praticiens, aux hydrogéologues agréés ainsi qu'aux administrations et agences de l'eau susceptibles de financer des études soit de protection des bassins d'alimentation des captages, soit de délimitation des périmètres de protection dans le cadre du respect de la loi sur l'eau en vigueur.

L'attribution des différents indices pour chacun des critères nécessite une bonne maîtrise des concepts de l'hydrogéologie karstique ainsi qu'une approche naturaliste sur le terrain, afin de pouvoir prendre en considération les caractéristiques physiques de l'aquifère. Ce guide donne les concepts de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des systèmes karstiques afin de poser des bases communes pour la délimitation des périmètres de protection dans ce type d'environnement hydrogéologique spécifique. Le système de pondération proposé est cadré, donnant des gammes de valeur pour les différents critères, mais nécessite la réalisation de tests pour déterminer la combinaison la plus appropriée au vu des caractéristiques du système. Les cartes des critères et la carte de vulnérabilité résultante doivent être accompagnées d'explications concernant la nature des données utilisées et le choix effectué pour attribuer une valeur d'indice.

La cartographie de la vulnérabilité de la source ou du captage fournit des bases soit pour contribuer à la définition des programmes d'action pour réduire les pollutions d'origine diffuse, soit pour établir les périmètres de protection. La traduction n'est pas automatique : elle nécessite d'une part de passer à l'échelle du parcellaire dans le cadre de l'établissement des périmètres de protection, d'effectuer des regroupements de zones de vulnérabilité similaires ou proches, et d'autre part de mener une étude détaillée de l'occupation des sols et des pressions polluantes.

Les cartes de vulnérabilité obtenues à l'aide de la méthode **PaPRIKa** ne doivent pas être utilisées pour l'implantation d'un site industriel ou agricole sans passer par l'établissement d'une étude détaillée d'impact sur l'environnement.

Sommaire

Préface	11
1. Introduction.....	13
1.1. CONTEXTE	13
1.2. OBJECTIFS DU GUIDE METHODOLOGIQUE	14
1.3. CONTENU DU GUIDE METHODOLOGIQUE	14
2. Environnement karstique et Vulnérabilité.....	15
2.1. AQUIFERE KARSTIQUE.....	15
2.1.1. Délimitation des aires d'alimentation	18
2.2. DEFINITIONS DE LA VULNERABILITE.....	18
3. Approche méthodologique	21
3.1. PAPRIKA, UNE METHODE MULTICRITERE	21
3.1.1. Evolution de la méthode, de EPIK à PaPRIKa en passant par RISKE, et RISKE2.....	21
3.1.2. Principe de la méthode PaPRIKa	21
3.1.2.1. Définition des critères de la méthode PaPRIKa.....	24
3.1.2.2. Poids des paramètres et classes de vulnérabilité.....	49
3.1.2.3. Reclassification de Vg.....	50
3.2. CRITERES ADDITIONNELS POUR CARTES SERVANT DE BASE A LA DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION	51
4. Exemples d'application.....	61
4.1. CAS D'UN KARST DE PLATEAU – SYSTEME KARSTIQUE DE L'OUYSSE (LOT)	61
4.1.1. Vulnérabilité de la ressource	61
4.1.2. Vulnérabilité des captages	66
4.2. KARST DE MONTAGNE	70
4.2.1. Vulnérabilité de la ressource	70

4.2.2. Vulnérabilité de la source.....	74
4.3. AQUIFERE KARSTIQUE DE LA CRAIE.....	76
4.3.1. Vulnérabilité de la source.....	76
4.3.2. Vulnérabilité des forages captés.....	80
5. Considérations pratiques.....	83
5.1. SOURCES DE DONNEES.....	83
5.2. OUTILS DE CARTOGRAPHIE.....	85
5.3. CONSEILS POUR LA PLANIFICATION DU TRAVAIL.....	85
5.4. ELEMENTS DE COÛT.....	86
6. Conclusions et perspectives.....	89
7. Glossaire.....	91
8. Bibliographie sommaire.....	93

Liste des illustrations

Illustration 1 : Représentation schématique d'un aquifère karstique (Bakalowicz, 1999).....	16
Illustration 2 : Illustration d'un épikarst (Mangin, 1975) et photo (N.Goldscheider).....	17
Illustration 3 : Les deux types de systèmes karstiques (in AERMC, 1999).....	17
Illustration 4 : Schéma conceptuel d'un aquifère karstique avec le positionnement des différents critères (d'après COST 620, Zwahlen et al.2004).....	22
Illustration 5 : Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques.....	23
Illustration 6 : Description de l'état de surface dans les bassins versants des pertes.....	25
Illustration 7 : Description du critère E – « aquifère épikarstique ».....	26
Illustration 8 : 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.....	27
Illustration 9 : Tableau de détermination des classes du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur.....	27
Illustration 10 : Tableau de détermination des classes du critère S à partir uniquement des classes d'épaisseur et de la pierrosité.....	28
Illustration 11 : Tableau décrivant la lithologie de la zone non saturée.....	28

Illustration 12 : Tableau de l'attribution de la valeur de l'indice ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation.....	29
Illustration 13 : Etapes de construction de la carte P pour le BAC des sources du Toulon	30
Illustration 14 : Carte et coupe géologique du système karstique de Lenclo.....	31
Illustration 15 : Etapes de construction de la carte P pour le BAC des sources de Lenclo et Bouyssac	33
Illustration 16 : Définition du critère R dans le cas d'un aquifère karstique de type karst « classique »	34
Illustration 17 : 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.....	35
Illustration 18 : Tableau de description des indices du critère R « réservoir roche aquifère »	37
Illustration 19 : Carte R sur le bassin de la source de l'Espérelle et coupe géologique simplifiée selon l'axe NS indiqué sur la carte. La carte et la coupe présentent le même figuré de couleurs lié à la vulnérabilité de la roche.....	39
Illustration 20 : carte du critère R « Roche réservoir » du Bassin d'alimentation du captage de la Fontaine-sous-Préaux	40
Illustration 21 : Tableau de description des indices du critère I « conditions d'infiltration »	41
Illustration 22 : Etapes d'élaboration de la carte du critère I « conditions d'infiltration » pour les bassins d'alimentation des captages du Blagour de Chasteaux et du Sorpt.....	43
Illustration 23 : Etapes de construction de la carte I pour la Fontaine sous Préaux (degré de vulnérabilité de I exprimée)	45
Illustration 24 : Classification typologique des captages (modifiée à partir de Technic'eau, Muet et al., 2006).....	46
Illustration 25 : Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession [Mangin, 1975] (El Hakim & Bakalowicz, 2007)	47
Illustration 26 : Tableau de description de l'indice Ka.....	48
Illustration 27 : Carte du critère Ka du Blagour de Chasteaux et du Sorpt (degré de vulnérabilité du critère Ka exprimé)	49
Illustration 28 : Tableau des pondérations pour les différents critères de la méthode PaPRIKa.....	50
Illustration 29 : Tableau des classes de vulnérabilité globale.....	50
Illustration 30 : Localisation des points d'injection des traçages prises en compte pour les systèmes du Blagour et du Sorpt	53
Illustration 31 : Données des essais de traçage pour le Blagour de Chasteau et le Sorpt (Muet, 1985).....	53
Illustration 32 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque de la source ou des captages du système karstique du Blagour de Chasteaux.	58

Illustration 33 : Cartes des quatre facteurs : Etat de surface, ZNS, Epikarst et Sol du critère P pour le système karstique de l' Ouyse (Lot) – impluvium karstique.....	62
Illustration 34 : Carte P de l'impluvium non karstique du système karstique de l'Ouyse (Lot).....	63
Illustration 35 : Carte du critère R du système karstique de l'Ouyse (Lot) –impluvium karstique	63
Illustration 36 : Carte du critère I de l'impluvium karstique du système karstique de l'Ouyse (Lot).....	64
Illustration 37 : Carte I de l'impluvium non karstique du système karstique de l'Ouyse (Lot).....	64
Illustration 38 : Carte du critère Ka de l'impluvium karstique du système karstique de l'Ouyse (Lot).....	65
Illustration 39 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque de la ressource pour le Système karstique de l'Ouyse (Lot).....	66
Illustration 40 : Tableau des essais de traçage du système karstique de l'Ouyse.....	67
Illustration 41 : Carte des aires d'alimentation des captages du système karstique de l'Ouyse (Lot) (les lignes en pointillé violet correspondent aux isochrones).....	68
Illustration 42 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque des trois captages du système karstique de l'Ouyse.	69
Illustration 43 : Carte du critère P à partir des facteurs E, ZNS et S du système karstique de la Fontaine d'Orbe.	70
Illustration 44 : Carte du réservoir rocheux R du système karstique de la Fontaine d'Orbe	71
Illustration 45 : Carte du critère I conditions d'infiltration pour le système karstique de la Fontaine d'Orbe.....	71
Illustration 46 : Carte du critère « degré de karstification » Ka pour le système karstique de la Fontaine de l'Orbe.	72
Illustration 47 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque de la ressource pour le système karstique de la Fontaine de l'Orbe.....	73
Illustration 48 : Localisation des essais de traçage du système karstique de la Fontaine d'Orbe	74
Illustration 49 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque du captage pour la Fontaine d'Orbe.....	76
Illustration 50 : Carte du critère P du système de Cany Barville	77
Illustration 51 : Carte du critère R roche du réservoir pour le site de Cany Barville	77
Illustration 52 : Carte du critère I pour le site de Cany Barville.	78
Illustration 53 : Carte du critère Ka de Cany Barville.....	78
Illustration 54 : Cartes de vulnérabilité du site de Cany Barville	79
Illustration 55 : Tableau des essais de traçage du site de Cany-Barville.....	80
Illustration 56 : Carte I _{captage} des forages de Cany-Barville	81

Illustration 57 : Cartes de vulnérabilité de la source ou du captage pour le site de Canyon-
Barville.....82

Liste des annexes

Annexe 1 : Eléments de géomorphologie karstique95
**Annexe 2 : Détermination détaillée du critère S pour des zones
spécifiques101**
**Annexe 3 :Fiches de synthèse des systèmes karstiques ayant fait l'objet de test
au cours du développement de la méthode PaPRIKa105**
**Annexe 4 : Zoom sur les cartes de vulnérabilité de la source pour les captages du
système karstique de l'Ouyse.....115**

Préface



Les stratégies de protection des ressources en eau dans le karst sont une des priorités de l'ONEMA, des agences de l'eau, dont plus particulièrement l'agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse, l'agence de l'Eau Adour Garonne et l'agence de l'Eau Seine Normandie. Les deux agences de l'Eau AERM&C et AEAG se sont engagées ensemble dans une démarche visant à protéger les ressources en eau d'origine karstique, très présentes et largement utilisées sur leur territoire. Elles sont à l'origine d'une étude initiée en 2004 comprenant deux étapes. La première a fait l'objet d'un bilan et analyse de la mise en œuvre des périmètres de protection des captages AEP en milieu karstique, réalisés par Ginger Environnement et SIEE. La deuxième étape en cours, a pour objet de proposer des stratégies de protection des ressources en eau dans les secteurs karstiques, s'appuyant sur des guides techniques spécialisés. Les préconisations faites à l'issue de la première partie comprenaient notamment l'élaboration de méthodes de référence assorties de guides afin de renforcer le cadrage méthodologique.

Ce guide méthodologique de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques est un de ces guides préconisés. Une méthode de cartographie de la vulnérabilité de la ressource et de la source ou du captage est proposée, sur laquelle les hydrogéologues pourront s'appuyer pour délimiter les périmètres de protection.

Ce guide a été élaboré en étroite concertation avec Valérie Plagnes, Maître de Conférences à l'université Paris VI (UMR Sisyphe) et Konstantina Kavouri, ingénieur de recherche à l'UMR Sisyphe, ainsi qu'avec la collaboration de Jérôme Gouin (GEOSOLEau) et échanges avec Ph. Muet (GINGER Environnement), Ph. Crochet (ANTEA) et P-H. Mondain (CALLIGEE), ces derniers étant en charge de la rédaction d'un guide pour l'élaboration des périmètres de protection en contexte karstique pour l'AEAG. De nombreux tests de la méthode ont été effectués grâce à l'impulsion et à la coordination de l'AEAG au cours du printemps et de l'été 2008. Ce sont au total quelques dix tests qui ont été menés dans le cadre de stages d'étudiants des universités de Bordeaux, Paris VI, Toulouse, Marne-la-Vallée et de l'ENSG. L'agence de l'Eau SN a également suivi la démarche avec le travail de 3 stagiaires de Master I de l'université de Rouen pour trois tests supplémentaires en aquifère karstique de type craie.

Que tous ces étudiants ainsi que leurs enseignants et tuteurs en bureaux d'étude soient remerciés pour leur précieux retour d'expérience, qui a permis d'améliorer la

méthode. Nous avons également tiré profits de leurs remarques et attentes pour la rédaction de ce guide.

Par ailleurs, il est nécessaire de mentionner que la méthode **PaPRIKa**, qui fait l'objet de ce guide, est une méthode qui est susceptible d'évoluer dans le temps. Si cette méthode n'est pas parfaite à 100%, elle a le mérite d'être proposée comme base commune de travail. Il sera nécessaire de faire un bilan de son application d'ici quelques années afin de l'adapter aux retours d'expérience ainsi qu'aux avancées scientifiques notamment dans le domaine de la validation de ce type d'approche.



1. Introduction



1.1. CONTEXTE

Les terrains carbonatés occupent près de 30% de la surface du territoire national ; le domaine karstique est particulièrement étendu sur les bassins du Rhône-Méditerranée et Adour-Garonne, ainsi que sur celui de la Seine Normandie pour les aquifères de la craie potentiellement karstiques. Ces terrains renferment de nombreux aquifères faisant l'objet d'exploitation au niveau de leurs exutoires pour des systèmes karstiques identifiés ou au niveau de forages. Ils constituent des ressources en eau importantes pour répondre aux besoins croissant des populations ; leur exploitation est considérée comme modeste actuellement au vu des volumes importants en jeu.

Toutefois, l'occupation croissante des terrains karstiques ainsi que leur vulnérabilité intrinsèque liée à leur structure et fonctionnement caractéristiques, nécessitent la mise en place de politiques de protection adaptées. Ces politiques passent nécessairement par la mise en place de périmètres de protection des captages d'eau destinés à la consommation humaine ainsi qu'à une cartographie de zones de protection vis-à-vis des pollutions diffuses des aires d'alimentation des captages (AAC) définis comme prioritaires à l'échelle des bassins versants de 1^{er} ordre français.

De nombreuses difficultés pour l'établissement des périmètres de protection pour les captages d'eau en milieu karstique ont été analysées dans le cadre de travaux coordonnés par les Agences de l'Eau Rhône-Méditerranée&Corse et Adour-Garonne. Les recommandations émises à l'issue de la première phase de l'étude portaient notamment sur la nécessité de disposer d'un guide d'élaboration de la cartographie de la vulnérabilité et d'éléments communs pour la délimitation des périmètres de protection des captages en milieu karstique, destinés à la consommation humaine.

Il est à noter que les Périmètres de Protection des Captages (article L1321-2 du code de la Santé publique) autour du point de prélèvement sont prévus par la réglementation avec pour objectif principal de renforcer la réglementation générale en matière de protection des eaux de façon à assurer la pérennité de la qualité des eaux distribuées et à garantir la santé publique. L'objectif de ces Périmètres de Protection est de protéger le captage des pollutions accidentelles.

1.2. OBJECTIFS DU GUIDE METHODOLOGIQUE

Les objectifs de ce guide méthodologique sont les suivants :

- (i) Disposer d'une méthodologie commune de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques, basée sur l'identification de critères intrinsèques du milieu karstique aquifère à partir de la géologie, de la morphologie et du fonctionnement hydrogéologique.
- (ii) Disposer d'une méthodologie pour établir des cartes de vulnérabilité afin d'estimer le risque de pollution accidentelle concernant les captages d'eau potable dans le cadre de la délimitation des périmètres de protection que les hydrogéologues agréés doivent proposer.
- (iii) Fournir des éléments pour établir des cartes de vulnérabilité pouvant être utilisées pour évaluer la vulnérabilité de la ressource vis-à-vis de pollutions diffuses pour des échelles de temps plus longues et ainsi un outil d'aide à la décision

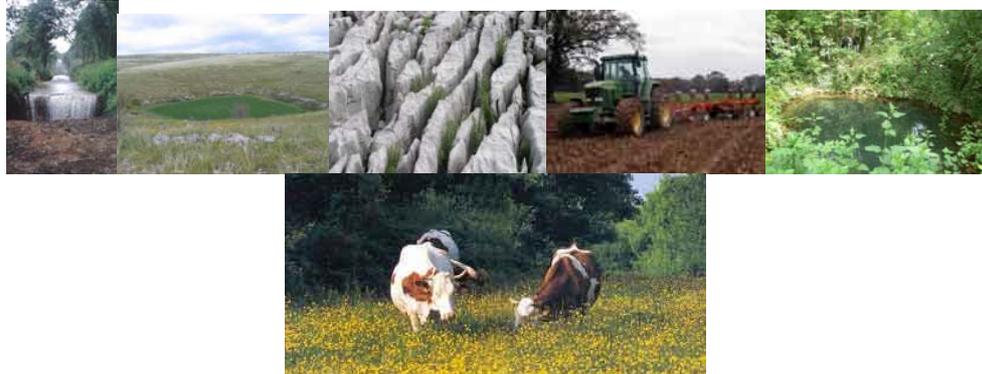
Ce guide s'adresse en premier lieu aux hydrogéologues des bureaux d'étude, des administrations, des agences de l'eau et aux hydrogéologues agréés, leur donnant des bases communes pour établir des cartes de vulnérabilité des aquifères karstiques considérant l'hydrogéologie de ces milieux et une approche naturaliste d'étude des aquifères karstiques à l'échelle des bassins d'alimentation. Ce guide donne ainsi le mode opératoire pour cartographier la vulnérabilité des aquifères karstiques, qui nécessite pour sa mise en œuvre de maîtriser tous les fondements de l'hydrogéologie karstique au préalable.

1.3. CONTENU DU GUIDE METHODOLOGIQUE

Ce guide méthodologique est organisé autour de 6 principaux chapitres, à savoir :

- un chapitre concernant la définition des concepts d'aquifère, de système karstique et de vulnérabilité ;
- un chapitre majeur concernant la description de l'approche méthodologique de la méthode **PaPRIKa** pour la vulnérabilité de la ressource et du captage, avec la définition des différents critères avec un certain nombre d'illustrations ;
- un chapitre consacré à la présentation de deux exemples d'application de la méthode **PaPRIKa : ressource et captage** ;
- un chapitre présentant des considérations pratiques en termes de données et de temps (coût) pour chaque étape en fonction de la taille des bassins d'alimentation et des données disponibles ;
- et finalement une conclusion et perspectives.

2. Environnement karstique et Vulnérabilité



2.1. AQUIFERE KARSTIQUE

Suite aux processus de karstification, les aquifères karstiques acquièrent une morphologie spécifique, en surface avec la présence de dolines, de vallées sèches, de lapiez, de gouffres et à l'intérieur du massif carbonaté avec l'existence de réseau de conduits pénétrables ou non par l'homme. Ces réseaux de conduits sont verticaux et horizontaux ; ils peuvent être étagés. Leur développement s'est effectué au cours des temps géologiques, influencés par les conditions externes tels que le climat, la végétation, les variations de niveau marin et donc du niveau de base avec le creusement des vallées, la nature de la roche et la tectonique. La karstification organise progressivement les écoulements et la structure des vides au sein de l'aquifère. Le fonctionnement de l'aquifère karstique, qui se manifeste notamment par la réaction de la source suite à des précipitations ou alimentation par des pertes, dépend globalement de l'existence et de l'organisation des vides au sein de sa matrice.

Le fonctionnement d'un aquifère karstique traduit différentes caractéristiques (Bakalowicz, 1999) : (i) variabilité spatiale et temporelle importante des paramètres hydrodynamiques du milieu aussi bien dans la zone d'infiltration que dans la zone noyée ; (ii) existence de forts contrastes de perméabilité ; (iii) existence de vitesses d'écoulement souterrain très rapide (quelques centaines de m/h) et (iv) des crues importantes rapides et de forte intensité, suivies d'une décrue rapide et d'un long tarissement.

L'organisation des écoulements au sein de l'aquifère aboutissant à des sources caractérisées par des débits pouvant être importants est le résultat du passage de l'eau au sein du massif calcaire de part l'existence d'un gradient hydraulique et d'autre part de son chimisme. L'eau crée ses propres structures de drainage en utilisant des fissures et fractures, aboutissant à la création de systèmes karstiques (Mangin, 1975) ; le système karstique constitue une entité à part entière au sein d'un aquifère karstique, sur laquelle les paramètres de la vulnérabilité intrinsèque doivent être définis.

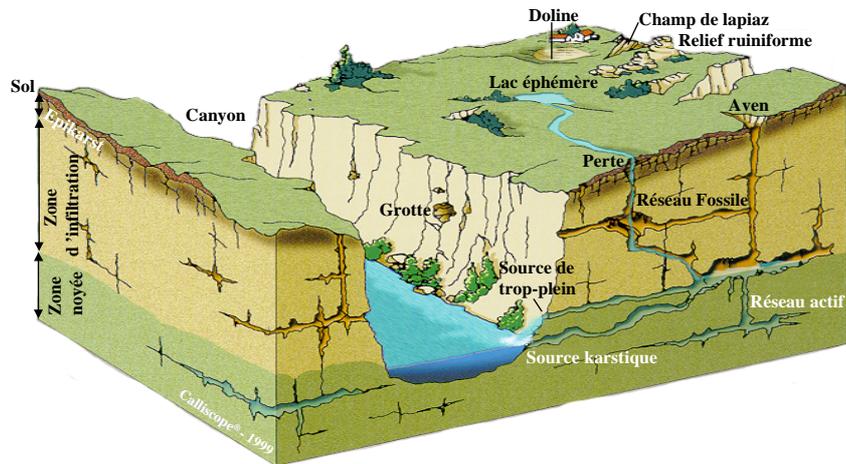


Illustration 1: Représentation schématique d'un aquifère karstique (Bakalowicz, 1999)

Un aquifère karstique comprend globalement deux zones principalement dans la verticalité :

- la **zone d'infiltration** : partie non saturée de l'aquifère, assurant l'écoulement des eaux d'infiltration au travers du massif, avec souvent un écoulement à composante horizontale prépondérante au niveau de l'épikarst, zone sous-cutanée de l'aquifère, d'une puissance de quelques mètres à une à deux dizaines de mètres, pouvant jouer le rôle de zone de stockage temporaire.
- la **zone noyée** : cette zone se situe en-dessous de la zone d'infiltration ; elle renferme la ressource exploitable soit à l'aide d'un forage, soit au niveau de la source. Deux types de structure sont à distinguer : (i) le réseau karstique constitué d'un ensemble organisé de drains, siège principal des écoulements au sein de la zone noyée et (ii) les blocs peu perméables encaissant le réseau de drains, siège d'écoulements lents, au sein desquels des volumes de stockage importants peuvent prendre place, latéralement au réseau de drains.

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

L'aquifère karstique possède des modalités d'infiltration particulières qui n'existent pas dans les autres aquifères. Il existe en surface, sur quelques mètres d'épaisseur, une

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



Illustration 2: Illustration d'un épikarst (Mangin, 1975) et photo (N.Goldscheider)

Lorsque des écoulements de surface contribuent à l'alimentation de la zone noyée à partir de pertes, le système karstique comprend d'une part la partie aquifère proprement dit et le bassin de surface drainé par des pertes. On distingue donc (Illustration 3) :

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

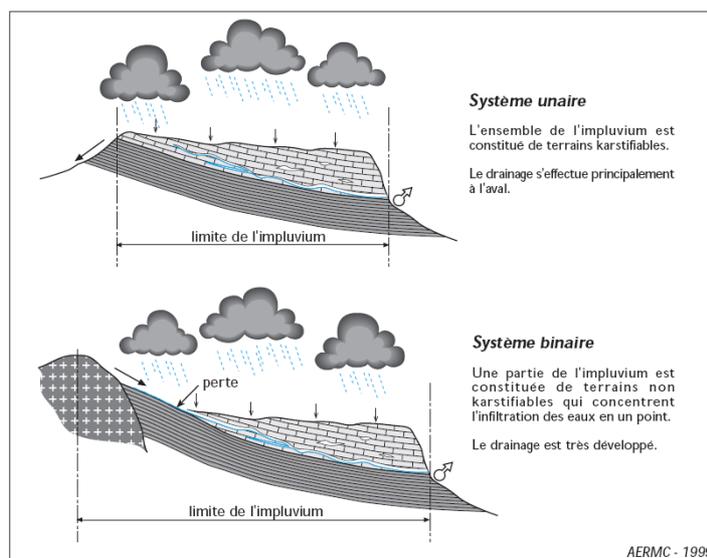


Illustration 3 : Les deux types de systèmes karstiques (in AERMC, 1999)

2.1.1. Délimitation des aires d'alimentation

Pour les aquifères karstiques, le bassin d'alimentation ne peut être défini uniquement à partir des critères topographiques. Il est nécessaire de prendre en considération une extension au-delà des lignes de crête, et également l'existence ou non de pertes au niveau des cours d'eau. La délimitation des aires d'alimentation des captages de sources ou forages en milieu karstique doit prendre ainsi en considération la caractérisation du type de système. Cette caractérisation nécessite une reconnaissance de terrain, des jaugeages différentiels sur le cours d'eau concerné supposé avoir des pertes en différentes conditions hydrologiques, un suivi hydrologique de la source sur un ou plusieurs cycles hydrologiques et une analyse des débits selon la méthode statistique des débits classés ; cette dernière permet de mettre en évidence l'existence d'une alimentation retardée ou d'un autre système (Marsaud, 1996).

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

- (i) à partir de la prise en considération de la **structure géologique** et de la mise en œuvre **d'essais de traçages artificiels** pour prouver l'existence de connexions hydrauliques pour différentes conditions hydrologiques (à noter l'existence possible de diffluences des écoulements en fonction des conditions hydrologiques : c'est-à-dire que la surface du bassin d'alimentation peut varier au cours d'un cycle hydrologique).
- (ii) à partir de la **délimitation du bassin versant des écoulements de surface alimentant les pertes**, à l'aide d'un modèle numérique de terrain et/ou des cartes IGN au 1/25.000 ;

Le **calcul du bilan hydrologique** permet une vérification de la surface du bassin délimité par les méthodes précédentes et/ou fournit des éléments pour mieux cibler sa délimitation (Vernoux et al. 2007, BRGM RP-55332-FR, BRGM RP-55874-FR).

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

2.2. DEFINITIONS DE LA VULNERABILITE

La vulnérabilité, terme définie notamment en 1970 par Albinet et Margat, est la possibilité qu'a un contaminant de percoler de la surface jusqu'au réservoir d'eau dans des conditions naturelles (transfert vertical). Cette définition a été reprise et complétée, notamment en distinguant la vulnérabilité intrinsèque de la vulnérabilité spécifique (liée à un contaminant particulier) (Foster, 1987 ; Margat et Suais 1987, Vrba et Civita, 1994).

La **vulnérabilité intrinsèque** est ainsi définie comme étant le 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.

La **vulnérabilité spécifique** quant à elle est définie comme la vulnérabilité d'un aquifère à un contaminant particulier ou à un groupe de contaminants. Elle prend en compte les propriétés des contaminants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque (COST 620, Zwahlen et al. 2004).

Deux distinctions doivent également être faites, d'une part la vulnérabilité de la ressource et d'autre part la vulnérabilité de la source. La **vulnérabilité de la ressource**: il s'agit de caractériser la vulnérabilité du transfert potentiel du contaminant au sein de la zone d'infiltration jusqu'à la surface de l'eau souterraine. Il s'agit de caractériser des zones qui influencent la qualité de l'eau à la source, de manière permanente, constituant un bruit de fond (pollution diffuse). La **vulnérabilité de la source** ou du captage doit être caractérisée en prenant en considération les caractéristiques du transit vertical et horizontal jusqu'à l'exutoire du système. Il s'agit d'identifier des zones plus vulnérables vis-à-vis de pollutions accidentelles et qui vont permettre le transit rapide et massif vers le captage (source, forage).

3. Approche méthodologique



3.1. PaPRIKa, UNE METHODE MULTICRITERE

PaPRIKa dont l'acronyme signifie « **P**rotection des **a**quifères karstiques basée sur la **P**rotection, le **R**éservoir, l'**I**nfiltration et le degré de **K**arstification », est une **méthode multicritère à index avec système de pondération** dont les critères sont sélectionnés en fonction des caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques.

3.1.1. Evolution de la méthode, de EPIK à PaPRIKa en passant par RISKE, et RISKE2

La méthode **RISKE** développée à partir de la méthode EPIK (Dörfliger, 1996) est une méthode qui sert à apprécier la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. La méthode **PaPRIKa** est quant à elle basée sur la méthode RISKE modifiée (Plagnes et al., 2006) en **RISKE2** pour laquelle le critère Infiltration est défini à partir des pentes et intègre les phénomènes exo-karstiques tels que dolines, avens et pertes. Le critère Epikarst est considéré comme un élément protecteur tout comme le critère Sol ; ainsi ces deux critères sont assemblés en un seul critère de protection avant agrégation de l'ensemble des critères.

La méthode **RISKE2** a évolué vers la méthode **PaPRIKa** afin de distinguer d'une part des critères associés à la structure et d'autre part des critères associés au fonctionnement hydrogéologique et de plus, de mieux caractériser le rôle de la zone non saturée, de l'état de surface des bassins versants non karstiques, des pertes et de l'aquifère épikarstique.

3.1.2. Principe de la méthode PaPRIKa

La méthode PaPRIKa est une méthode multicritère de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère karstique. Les cibles de cette méthode sont d'une part la **ressource** et d'autre part le **captage**. L'essentiel des critères permet de caractériser le transfert depuis la surface vers la zone saturée, donc la ressource ; le transfert au sein de la zone saturée est pris en considération dans un deuxième temps, avec une notion de vitesse de transfert basée sur les résultats d'essais de traçage artificiel. L'intégration de cette notion dans le critère Infiltration modifiée, à la carte de vulnérabilité de la ressource permet d'obtenir une carte de vulnérabilité du captage qui servira à la délimitation des périmètres de protection.

La méthode PaPRIKa est une méthode spécifiquement développée pour les aquifères karstiques. Ainsi, la méthode ne s'applique pas sans discernement pour tous les aquifères carbonatés. Si l'aquifère carbonaté n'est pas caractérisé par un fonctionnement karstique¹, l'aquifère est considéré comme un aquifère fissuré, pour lequel la méthode PaPRIKa ne s'applique pas. La méthode est appliquée à l'ensemble du bassin d'alimentation, ainsi qu'aux bassins versants des pertes associées, même si ceux-ci ne reposent pas nécessairement sur des formations carbonatées karstiques. Tous les critères ne feront pas l'objet d'une cartographie dans ce cas spécifique.

La méthode PaPRIKa est une méthode de cartographie à index à pondération des critères. 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 (i) 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, (ii) le critère R pour la nature de la roche du réservoir souterrain, (iii) le critère I pour la nature de l'infiltration (diffuse ou ponctuelle au niveau de phénomènes exokarstiques) et (iv) le critère Ka pour le degré de karstification et le fonctionnement du système karstique (Illustration 4 et Illustration 5).

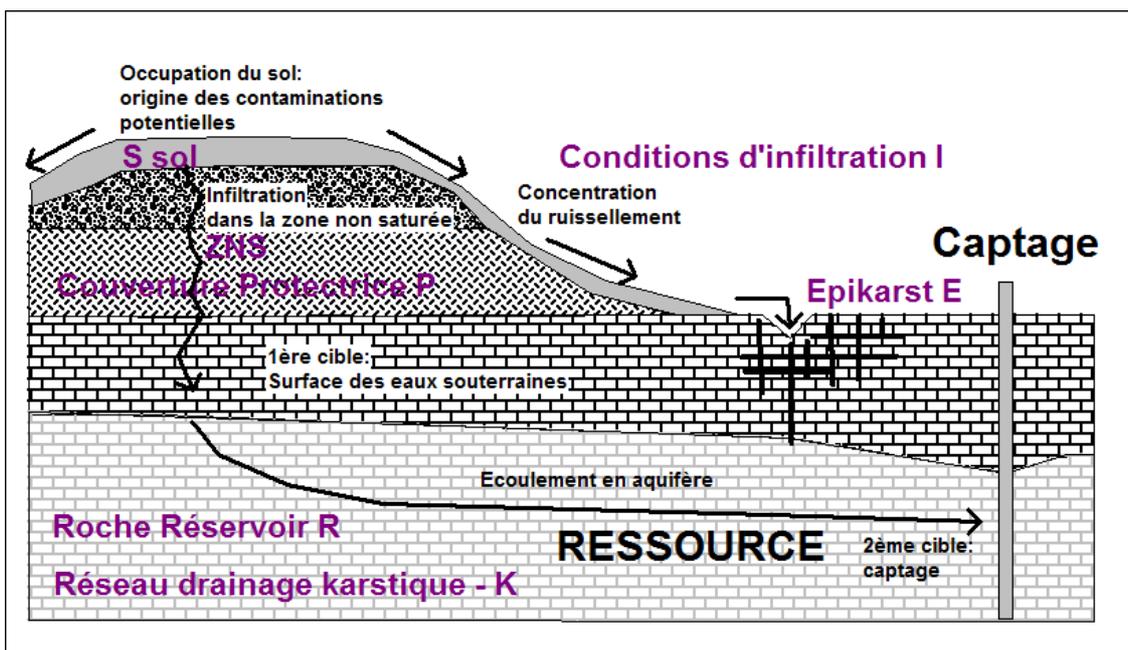


Illustration 4 : Schéma conceptuel d'un aquifère karstique avec le positionnement des différents critères (d'après COST 620, Zwahlen et al.2004)

¹ Pour la caractérisation d'un aquifère karstique, se rapporter au guide méthodologique concernant les outils de l'hydrogéologue pour les aquifères karstiques (Dörfli et al, 2010 – guide ONEMA-BRGM).

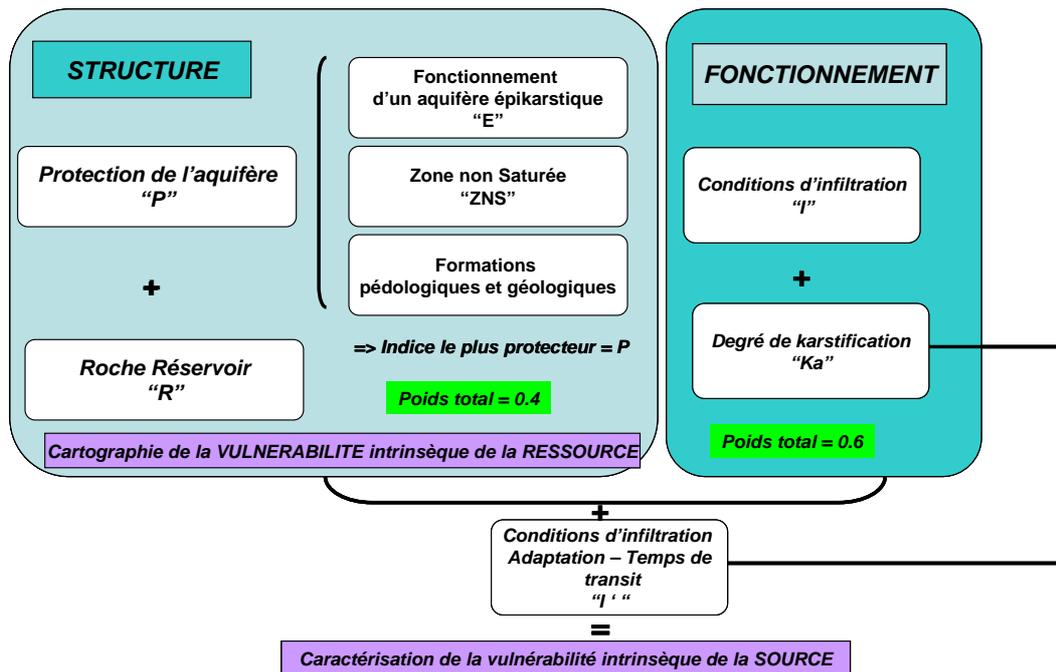


Illustration 5 : Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques

La méthode de cartographie de la vulnérabilité PaPRIKa est mise en œuvre selon 6 étapes principales, à l'échelle d'un bassin d'alimentation d'un captage ou d'un ensemble de bassins d'alimentation, dont le contour a été déterminé au préalable :

- (1) **Séparation du bassin en des zones karstiques et non karstiques** (dans le cas d'un système karstique binaire). Les deux parties du bassin seront traitées séparément : pour la partie karstique, tous les critères doivent être cartographiés, tandis que pour la partie connexe seuls les critères P et I seront cartographiés.
- (2) **Cartographie de chaque critère** à l'échelle adaptée à la dimension du bassin d'alimentation (1/10 000 à 1/50 000). Chaque critère est subdivisé généralement en 5 classes matérialisées par un indice compris entre la valeur 0 (vulnérabilité minimale) et la valeur 4 (vulnérabilité maximale). Cette étape de cartographie est réalisée à l'aide d'un logiciel de système d'information géographique permettant la transformation du format vectoriel au format raster (Mapinfo + module Vertical mapper, ArcInfo avec le module Spatial Analyst, IDRISI, ...), à partir de données disponibles sous forme de cartes, d'observations et d'acquisition de données sur le terrain. Les points d'acquisition sur le terrain sont référencés et reportés sur les cartes. Les points de d'acquisition de données sur le terrain constituent des indices de terrain ou indices de confiance lors de l'établissement de la carte de critère et la carte finale. Ces points sont renseignés dans une base de données assortie d'une banque d'images.

- (3) **Discrétisation des cartes.** La taille du pixel est à définir en fonction de la taille des objets à cartographier, notamment au niveau du critère I (la plupart du temps, la résolution sera celle du modèle numérique de terrain disponible utilisé (50 mx50 m ou de préférence 25 mx25 m)).
- (4) **Calcul de l'indice de vulnérabilité global Vg** en chaque maille. L'indice de classe de chaque critère est multiplié par le facteur de pondération du critère considéré. Les valeurs obtenues pour les 4 critères sont additionnées en chaque pixel, afin d'obtenir l'indice de vulnérabilité global Vg. Il s'agit donc d'une superposition des 4 cartes afin d'obtenir une carte de la répartition de l'indice Vg.
- (5) **Etape de reclassification.** La valeur de l'indice Vg est ensuite subdivisée en 5 classes équidistantes de vulnérabilité traduisant la sensibilité du milieu aux influences naturelles et anthropiques à un instant donné. Des modifications de l'occupation du sol ne sont pas prises en considération.
- (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.

3.1.2.1. Définition des critères de la méthode PaPRIKa

a. Critère P

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 d'une part du critère « Sol ou Couverture pédologique » (S), d'autre part du critère « aquifère épikarstique » (E) et finalement de la nature, de l'épaisseur et de la 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.

En revanche dans les bassins versants où le ruissellement vers un point d'infiltration préférentielle est observé – pertes -, le critère P caractérise l'état de la surface vis-à-vis du refus à l'infiltration. Cet état de surface est défini ci-dessous.

- **L'état de surface**

L'état de surface est pris en compte dans les bassins versants des pertes au sein desquelles du ruissellement est constaté de façon temporaire ou pérenne. **L'état de surface est le seul critère à renseigner** au niveau de ces bassins versants, pour définir le critère P.

L'état de surface 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 6).

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 6 : Description de l'état de surface dans les bassins versants des pertes

- **Critère E – Aquifère épikarstique**

L'épikarst ou zone sous-cutanée correspond à la partie superficielle d'une formation carbonatée fortement altérée, située directement sous la surface du sol, sous la couverture pédologique lorsqu'elle est présente ou exposée à la surface (Williams, 2008). Son comportement hydrogéologique a été caractérisé par Drogue (1974 et 1992) et conceptualisé selon une approche systémique par Mangin (1975). La porosité et perméabilité sont plus fortes à proximité de la surface, en d'autres termes, ces paramètres hydrodynamiques diminuent avec la profondeur. Par conséquent, l'eau qui s'infiltré suite à des précipitations, peut être stockée au niveau de la base de l'épikarst. Ce niveau constitue ainsi un niveau d'aquifère perché. Cet aquifère perché est drainé verticalement dans la zone non saturée, via des fissures et fractures plus ou moins de grande dimension en fonction du degré de karstification du massif. Le contraste de porosité et perméabilité avec la profondeur peut ne pas exister ou n'être pas suffisant pour que cette zone sous-cutanée ait un fonctionnement de type épikarstique. La dimension verticale de la zone épikarstique peut être métrique à pluri-métrique, pouvant atteindre quelques 10 mètres voire plus. Le stockage temporaire d'eau d'infiltration donne également lieu à des sources, à l'existence d'exploitation par puits sur des plateaux (ex. Causses). Des sources temporaires peuvent exister à la limite inférieure de l'épikarst, considéré ainsi comme un aquifère épikarstique.

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 ou pouvant être supposé

épikarstique 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 à ce sujet. Dans ce cas, elle ne témoigne pas de l'existence d'un aquifère épikarstique.

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 7).

E1	aquifère perché avec présence de puits et d'un niveau piézométrique, voir 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 7 : Description du critère E – « aquifère épikarstique »

- **Critère 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 et de la source 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'Epikarst (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**.

Un sol est par nature présent sur toutes les formations géologiques exposées à la surface. Sa nature et ses caractéristiques physico-chimiques sont intimement liées à

son origine de formation (altération de la roche) et son histoire (épisodes climatiques, colonisation végétale, exploitations agricoles...). Son plus ou moins grand développement pourra introduire une certaine valeur de protection 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. 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.

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.

Trois classes de textures ont été retenues dans la même optique que les études précédentes (Desprats et al., 1998 ; Dörfli, 1996 ; Suais et al., 1990) : dominante d'argiles, dominante de limons, dominante de sables. De la même façon trois classes de pierrosité ont été identifiées : 0-30% de cailloux, 15-60% de cailloux et > 60% de cailloux. Ces deux paramètres ont été croisés pour déterminer la nature du sol (Illustration 8) qui est ensuite croisée avec l'épaisseur des sols (Illustration 9).

		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 8 : 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	1	2	3	4
Zones imperméabilisées		S0				
EPAISSEUR	> 5 m	S1	S1	S1	S2	S3
	1-5 m	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 9 : Tableau de détermination des classes 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, l'indice S défini à partir de l'épaisseur **Se** peut être modifié en fonction de la pierrosité en **Sep** de la manière suivante (Illustration 10) :

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

Illustration 10 : 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, en dehors d'un aquifère épikarstique, 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 drainage verticale descendante vers l'aquifère sous-jacent, dont on cartographie la vulnérabilité.

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

De plus, pour une étude détaillée de la couverture pédologique sur des secteurs particuliers ou lorsque ces données sont disponibles dans des bases de données, la détermination de l'indice S peut être effectuée à l'aide du tableau excel « actif » donné en annexe 2.

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.

- **Critère ZNS (caractéristique 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 : roche calcaire, épaisseur faible et fissuration importante (Illustration 11).

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 11 : 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 à partir de l'exutoire, en considérant le niveau piézométrique comme celui correspondant à celui de l'exutoire du système et en considérant l'altitude de sources de débordement également. Un gradient peut être appliqué de manière graduelle. Trois classes d'épaisseur de la zone non saturée sont proposées : (i) < 15 mètres, (ii) 15 à 50 mètres et (iii) 50 mètres et supérieur

Le **degré de fracturation** est caractérisé aussi bien à l'échelle locale que globale, en considérant des affleurements et les zones de faille.

Le **critère ZNS** est ainsi représenté sous forme de 5 classes, résultant de la combinaison des paramètres exposés ci-dessus (lithologie, épaisseur et fracturation) (Illustration 12).

ZONE NON SATUREE (ZNS)		EPAISSEUR		
		> 15 m	15-50 m	> 50 m
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 12 : Tableau de l'attribution de la valeur de l'indice ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation

- **Exemples de la mise en œuvre du critère P**

Cas du système karstique du Toulon (Corrèze)

Il s'agit d'un système karstique sous couverture dont la source est captée et alimente la ville de Périgueux en eau potable (Dordogne). Une description précise du site est donnée dans les rapports d'Angeli (1996), de Vouvé (1997), et dans Ogoula-Arondo (2008), ainsi que sous forme synthétique dans l'annexe 3. Sur ce site, l'épikarst n'est pas observable et le bassin ne comporte pas de pertes (la carte « état de surface en amont des pertes » n'est pas nécessaire). En conséquence la carte P sera réalisée uniquement à partir des cartes S et ZNS.

Les niveaux les plus protecteurs de la ZNS sont caractérisés par une lithologie marno-calcaire, moyennement fracturée et exempte de grands accidents tectoniques. L'épaisseur de cette ZNS est estimée supérieure à 50 m sur l'ensemble du bassin, excepté dans les vallées de l'Isle au Sud et de la Beauronne au Nord.

Le Sol a été examiné lors de campagnes de terrain, sur des sites ponctuels, puis une représentation spatialisée en extrapolant les résultats à l'ensemble du bassin en considérant les contours des formations superficielles issues de la carte géologique.

Toutes les classes sont représentées sur la carte S. La zone urbaine de Périgueux a été classée en S0 au Sud de la carte. Les argiles sur alluvions sont classées en S1, les altérites d'épaisseur variables et constituées de sable argileux sont classées en S2, le sol sur les colluvions/alluvions est classé en S3 et enfin le sol reposant directement sur le calcaire est classé en S4.

L'indice le plus protecteur en chaque pixel est conservé pour établir la carte P (Illustration 13).

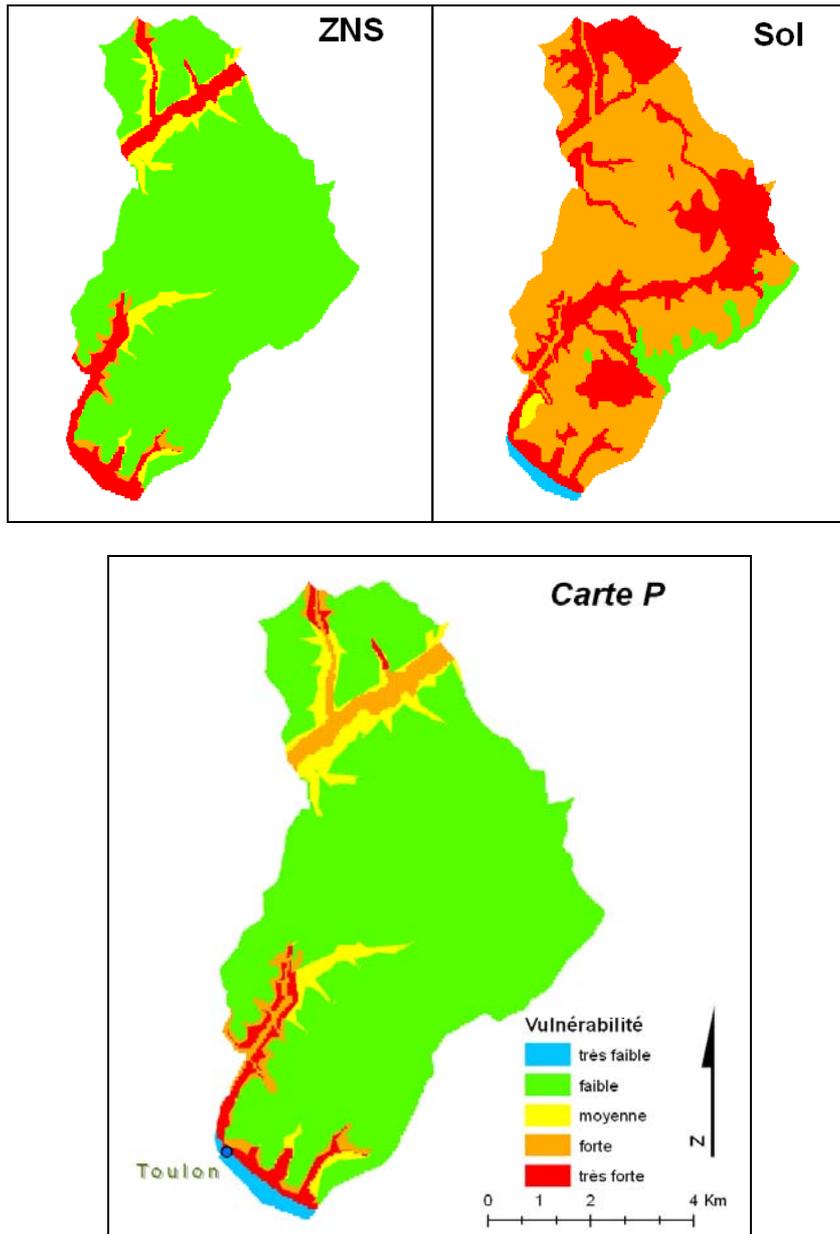


Illustration 13 : Etapes de construction de la carte P pour le BAC des sources du Toulon

Cas des systèmes karstiques de Lenclio et Bouyssac (Lot)

Les systèmes karstiques de la source de Lenclio et de Bouyssac sont situés dans les calcaires jurassiques sur la rive gauche du Lot. Une description précise du site est donnée dans Balayre et al. (2008), ainsi que sous forme synthétique dans l'annexe 3.

La réalisation de la carte P pour ces deux systèmes a été effectuée en considérant les points suivants :

1. Dans le bassin d'alimentation de la perte de la Rivière (au Sud-Est), les terrains molassiques assurent un ruissellement très efficace vers la zone de perte, l'ensemble du bassin a donc été classé en P4 ;
2. Un aquifère épikarstique caractérisé par des sources temporaires peut être observé dans l'une des unités des calcaires du Kimméridgien supérieur (U3, Illustration 14), lorsque ces formations affleurent. Ces formations ont donc été classées en E2. Aucun épikarst n'a été observé au sein des autres formations carbonatées affleurantes ;
3. La Zone non saturée (ZNS) est caractérisée par une lithologie variable liée à la structure de ce système (ZNS=1 pour les marnes, ZNS=2 pour les marno-calcaires et ZNS=3 pour les calcaires des unités 2 et 4 (Illustration 14) et une fracturation importante, voire très importante dans les zones de faille (ZNS=4). L'épaisseur de cette zone est partout supérieure à 50 m, à l'exception de la Combe de Bazérac (à l'Est) où elle est de plus faible puissance ;

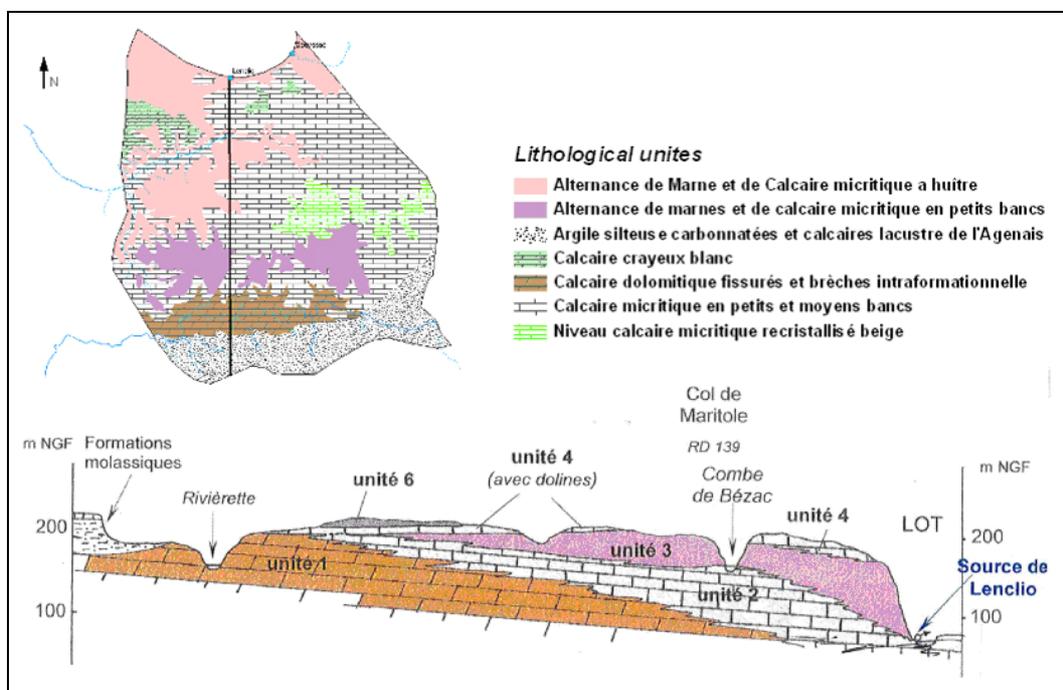


Illustration 14 : Carte et coupe géologique du système karstique de Lenclio

4. La couverture pédologique S est caractérisée par une large gamme d'indices. Un indice S1 a été attribué au recouvrement limoneux de plusieurs mètres d'épaisseur au niveau de la Combe de Bazérac, mais aussi pour les alluvions limoneux/argileux de forte épaisseur au niveau de la vallée du Lot ainsi qu'aux terrains molassiques dans la zone méridionale. Un indice S2 a été attribué pour les remplissages des dolines, pour les terrains cultivés sur terrains gras et légèrement caillouteux d'épaisseur inférieure à 1 mètre. L'indice S3 a été réservé aux zones agricoles situées dans les points hauts du causse, car le sol de texture grossière est caractérisé par une épaisseur comprise entre 20cm et 1 m. Enfin, de grandes zones sont classées en S4, car leur recouvrement est quasi nul, en particulier sur le plateau de Thézac au Sud, ainsi qu'au niveau des pentes non protégées.

Finalement, l'indice le plus protecteur en chaque pixel est conservé pour établir la carte P (Illustration 15).

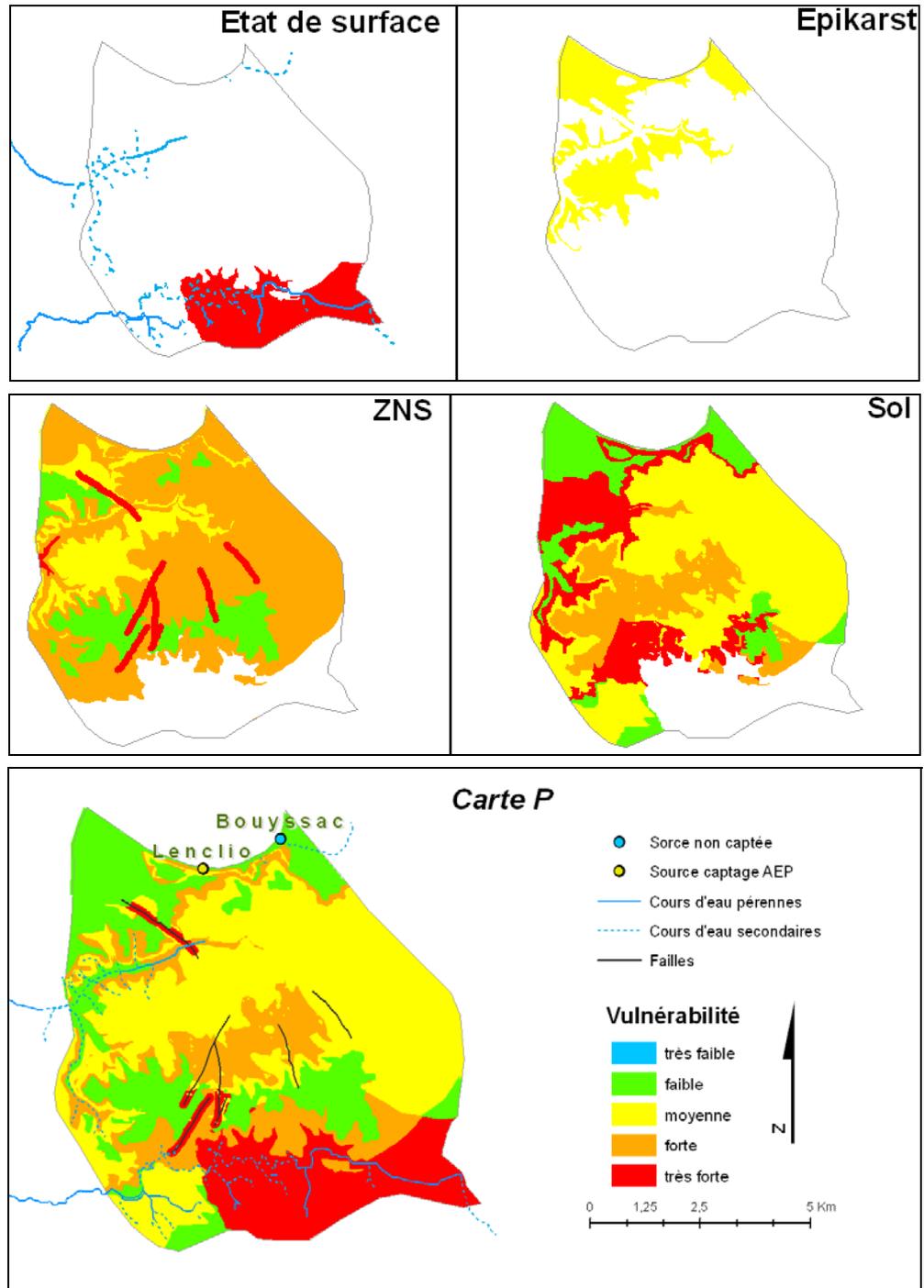


Illustration 15: Etapes de construction de la carte P pour le BAC des sources de Lenclo et Bouyssac

b. Critère R

Ce 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) 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, pour autant 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 16 et Illustration 17).

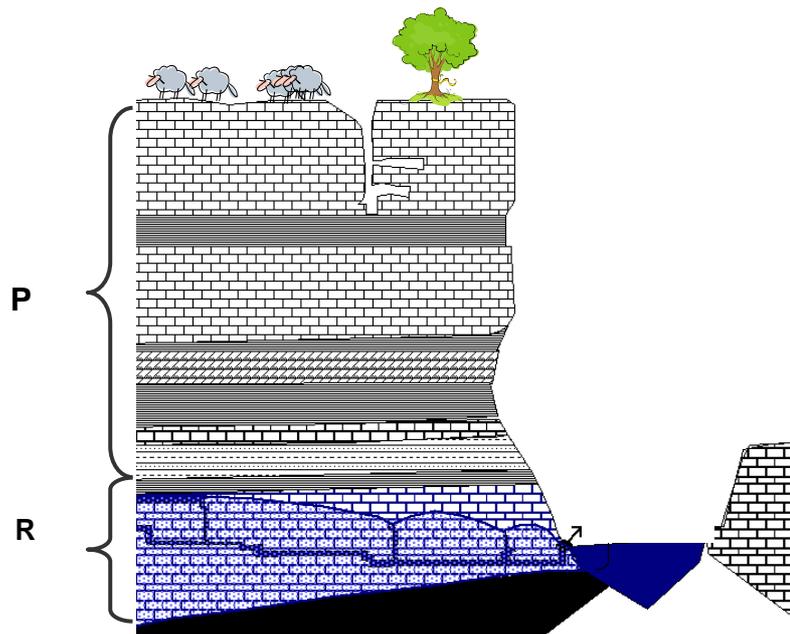


Illustration 16 : Définition du critère R dans le cas d'un aquifère karstique de type karst « classique ».

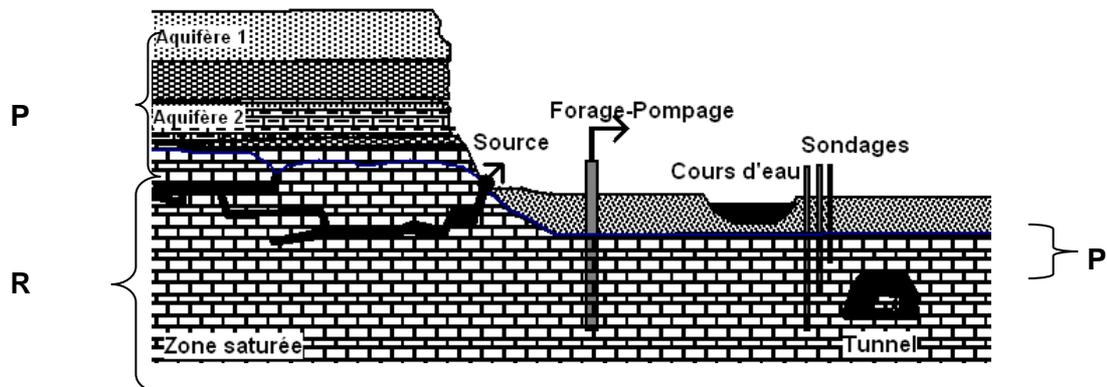


Illustration 17 : Définition du critère R au sein de la Zone saturée dans le cas d'aquifères superposés à partir de données à l'affleurement proche de la source, des données de forages-sondages, galeries et objets géotechniques de type tunnel.

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 en présence et éventuellement évaluer l'importance des zones de broyage associées. Il n'est pas rare que la description lithologique d'une formation litho-stratigraphique 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'un bassin 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. Il est laissé à l'appréciation de l'utilisateur moyennant explication fournie dans le texte accompagnant la mise en œuvre de la méthode, d'attribuer une valeur d'indice +1 ou -1 considérant la définition proposée et la réalité de terrain.

Les failles ou zones de failles présentes à l'échelle du bassin d'alimentation du captage et affectant le réservoir seront prises en considération si leur rôle favorisant les écoulements souterrains est démontré ou suspecté. 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 ; le réalisateur de la carte, à partir d'observations de terrain, sera en mesure d'apprécier au mieux la dimension adéquate qu'il attribuera et argumentera.

La direction de la fracturation en lien avec les déformations est un élément qui peut être pris en considération, du fait de son rôle sur l'organisation des écoulements. On peut s'attacher à caractériser **l'ellipsoïde de déformations et non des contraintes**, et sans considérer la chronologie des jeux successifs des failles. Certaines fractures peuvent être des fractures de compression, avec la présence d'argiles et de minéralisation, d'autres sont des fractures de distension, ouvertes permettant des écoulements. La cartographie de ces fractures peut être un élément fastidieux et long. Une analyse statistique peut être conduite en considérant un nombre limité de stations de mesure afin de déterminer à partir de la mesure des directions des stylolithes, des limites inter-bancs, des failles et fractures, les directions des contraintes. Cette analyse structurale peut être faite à l'aide de la méthodologie proposée par Eraso (1985). Le principe de la méthode est d'identifier les plans en distension qui permettent un écoulement, selon le postulat de départ. Cette méthode nécessite de déterminer l'ellipsoïde des déformations de la roche aquifère, à partir d'observations et de mesures effectuées sur le terrain prenant en compte la nature et l'orientation des fractures et des micro-fractures. Les failles, les stylolithes (illustrations de la compression perpendiculaires à la composante majeure de l'ellipsoïde de déformation), et les veines (témoin d'une tectonique de distension) sont relevés sur des affleurements répartis sur le bassin d'alimentation du système. La présentation des résultats sous forme d'histogramme des directions des plans de drainage selon l'azimut des plans en degré au niveau de l'abscisse permet de mettre en évidence la ou les directions prépondérantes selon lesquelles se développent les plans de drainage du système karstique. Une représentation des données sur un diagramme de Wülf ainsi qu'une représentation polaire des plans de drainage permet de mettre en évidence la manière dont se développe la fracturation par rapport à la verticalité.

Le résultat d'une telle étude de la fracturation permet de définir les **directions principales** qui jouent un rôle dans l'organisation des écoulements souterrains. Le résultat permet de pouvoir sélectionner les failles principales en grand et leur zone tampon, voir des zones plus fracturées que d'autres en considérant la représentativité des directions des failles liées aux axes de drainage souterrain.

Les principales formations géologiques à potentialité aquifère ont été classées en fonction de l'influence qu'elles peuvent avoir sur la vulnérabilité des aquifères (Illustration 18) :

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 là encore relativement lentes.
R₂	Cette classe regroupe les formations de calcaires marneux (la proportion argileuse est plus faible que pour la classe R₁ : 10-25%), craie affectée d'une fracturation forte ; Calcaires et dolomies en petits et gros bancs avec fracturation homogène et pendage ou contre pendage inférieur à 45 degrés , dont le sens est favorable à un écoulement en direction du captage comme cela l'est confirmé par ailleurs lors de la délimitation préalable du bassin d'alimentation.
R₃	<p>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 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Calcaires et dolomies massifs en gros bancs fracturés et karstifiés, - Calcaires et dolomies en gros bancs avec un pendage ou contre-pendage supérieur à 45 degrés par rapport à la localisation de la source
R₄	Cette classe regroupe les zones reconnues cartographiées ou présumées de réseau de cavités et de zones de failles affectant le réservoir, parallèles au gradient hydraulique.

Illustration 18 : Tableau de description des indices du critère R « réservoir roche aquifère »

De manière générale, en contexte structural accidenté pouvant présenter des pendages importants dans des formations carbonatées aquifères, une valeur de **pendage supérieure à 45 degrés** dans un sens favorable à l'écoulement en direction du captage, peut conduire l'opérateur à rajouter une valeur de 1 à l'indice retenu à partir de la lithologie et de la fracturation (voir exemple de la Fontaine d'Orbe dans le chapitre 4).

- **Exemples de la mise en œuvre du critère R**

Cas du système karstique de l'Espérelle (Larzac)

Ce système appartenant au causse du Larzac septentrional a fait l'objet d'une application de la méthode PaPRIKa (El Azawi et al., 2009). Le niveau de l'eau dans le système karstique a été estimé par une interpolation du niveau de la source à l'ensemble de l'aquifère. La carte R représente donc la nature lithologique et le degré de fracturation des roches qui constituent ce réservoir, en dessous de ce niveau d'eau.

La coupe géologique (Illustration 19) permet de constater que le réservoir est localisé dans sa partie nord par des roches classées en R3 ; il s'agit des calcaires du Bathonien inférieur et du Bajocien qui présentent des bancs relativement fracturés et peu d'intercalations marneuses (Ricard et Bakalowicz, 1996). La partie sud du réservoir est localisée dans les calcaires de l'Aalénien, il s'agit de calcaires marneux en petits bancs qui ont été classés en R2 (Illustration 19).

Certaines failles ainsi qu'une zone tampon de 50 m autour de celles-ci ont été cartographiées en R4. Les failles qui ont été retenues sont les accidents principaux de direction NS, compatible avec le gradient hydraulique actuel (vers la Dourbie située au Nord du système), et sur le trajet desquelles sont aussi superposées des formes de surface (alignement d'avens) qui témoignent d'une fracturation ouverte supposée favoriser les écoulements vers la source.

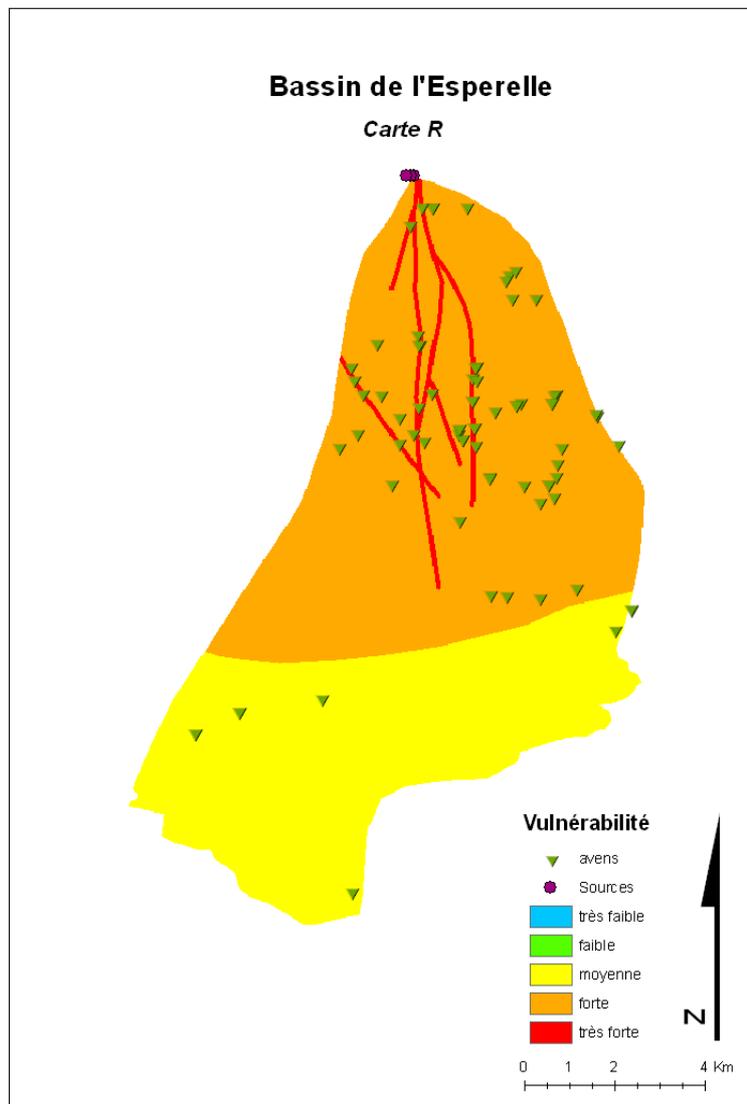
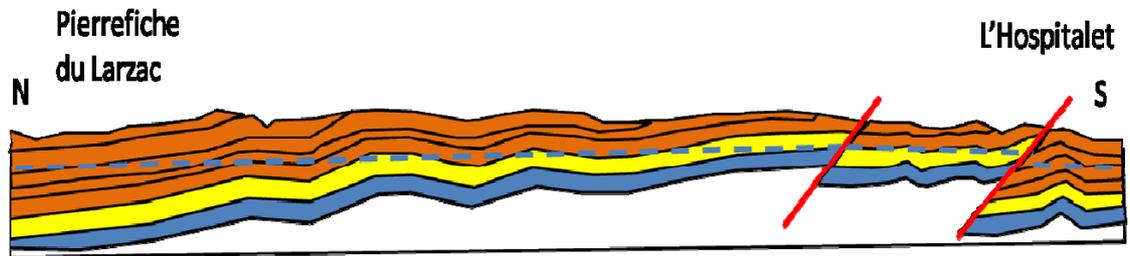


Illustration 19 : Carte R sur le bassin de la source de l'Espérelle et coupe géologique simplifiée selon l'axe NS indiqué sur la carte. La carte et la coupe présentent le même figuré de couleurs lié à la vulnérabilité de la roche.

Cas du système karstique de Fontaine sous Préaux (Seine Normandie)

Le réservoir aquifère est localisé dans la craie du Coniacien, une craie blanche et riche en silex, à forte porosité et bonne perméabilité (Laignel, 2003). Une description détaillée de ce site est donné dans Leclerc et al. (2008) et dans l'annexe 3.

La craie a été classée en R2. L'axe des vallées, supposé correspondre à des accidents structuraux facilitant la circulation des eaux, de même que la faille de Fécamp-Douville (faille majeure au sein du bassin) qui pourraient favoriser les écoulements souterrains ont été classés en R4 (Illustration 20).

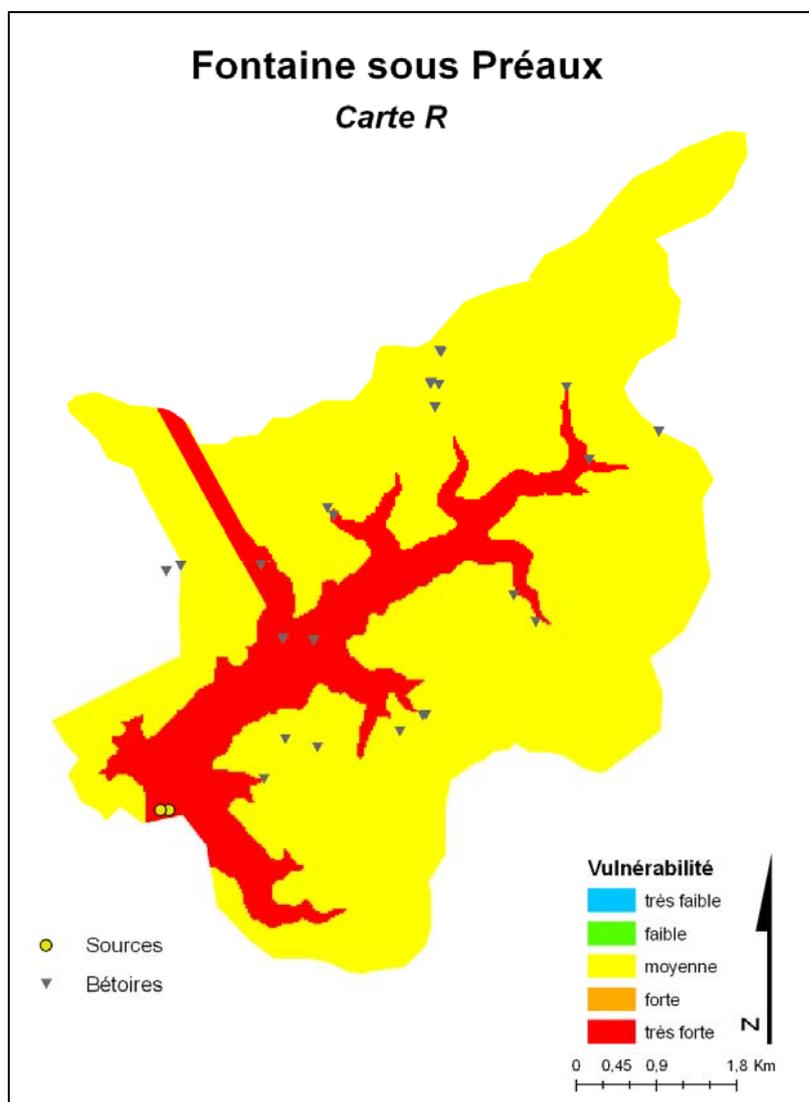


Illustration 20 : carte du critère R « Roche réservoir » du Bassin d'alimentation du captage de la Fontaine-sous-Préaux

c. Critère I

Le critère I concerne les conditions d'infiltration. Une des caractéristiques des aquifères karstiques, est l'existence d'une dualité de l'infiltration à l'échelle du bassin d'alimentation. L'infiltration est d'une part diffuse et d'autre part concentrée et ponctuelle au niveau de pertes temporaires ou permanentes le long de bassins versants de cours d'eau situés au sein du bassin d'alimentation du captage. L'infiltration dépend 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. 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 ainsi, 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 ainsi : des vallées sèches, des dolines et poljés, des lapiez, des gouffres et des pertes.

Une distinction est ainsi faite entre infiltration diffuse et infiltration ponctuelle. Les paramètres primordiaux sont la pente qui favorise plus ou moins le ruissellement au détriment de l'infiltration, et les pertes qui permettent une infiltration très rapide jusqu'à l'aquifère. La carte des pentes peut être réalisée à partir du Modèle Numérique de Terrain.

Indice	Description
I0	Cette classe regroupe les zones du bassin où les pentes sont très fortes (>50%), induisant un ruissellement de l'eau très important (vers d'autres aquifères ou la mer etc.) et une infiltration négligeable voire même nulle.
I1	Zones où les pentes sont fortes (15-50%) favorisant grandement le ruissellement.
I2	Zones du bassin où la pente est moyenne (5-15%) et/ou zones où le ruissellement est limité en terrains carbonatés (ex. vallées sèches, 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	Manifestations de l'infiltration concentrée au niveau des pertes. Ne sont retenues dans la classification "perte" que les pertes situées sur un cours d'eau pérenne ou temporaire. A 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 21 : Tableau de description des indices 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.

- **Exemples de la mise en œuvre du critère I**

Cas des systèmes karstiques du Blagour de Chasteaux et du Sorpt (Lot)

Ces systèmes sont développés dans les calcaires jurassiques du causse de Martel appartenant au Sud du département de la Corrèze et au Nord du département du Lot. Deux exutoires distincts drainent les eaux souterraines. Une description plus précise du site est donnée dans Muet (1985) et sous forme plus concise dans l'annexe 3. La méthode PaPRIKa a été appliquée à l'ensemble du bassin (Paris, 2008).

La carte I est réalisée en intégrant les quatre points suivants :

1. L'ensemble du bassin amont de la perte de la Couze (au Nord-Est) est classé en I4 compte tenu de la présence d'un cours d'eau permanent ;
2. Une carte des pentes du bassin karstique sensu-stricto est réalisée selon les classes définies dans la méthodologie, les pentes les plus fortes se situent au niveau de la vallée d'Entrecors (NW) ;
3. Les pertes et leurs bassins d'alimentation sont cartographiés en I4 ; l'indice I3 est attribué aux dolines et à leurs bassins. Dans certains secteurs, plusieurs dolines situées proches les unes des autres ont été jointes en une zone I3 ;
4. L'indice le plus vulnérable en chaque pixel est conservé pour créer la carte I (Illustration 22).

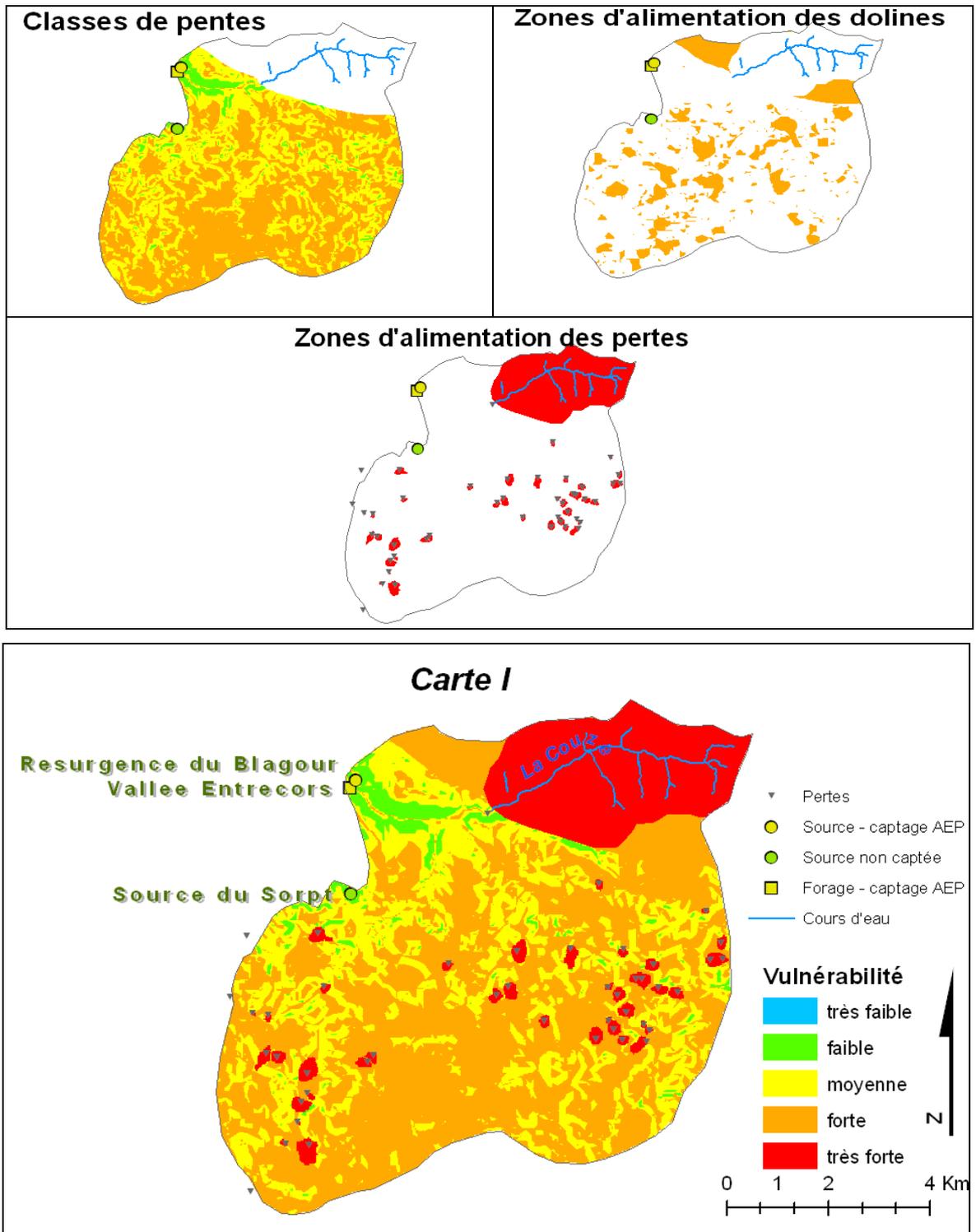
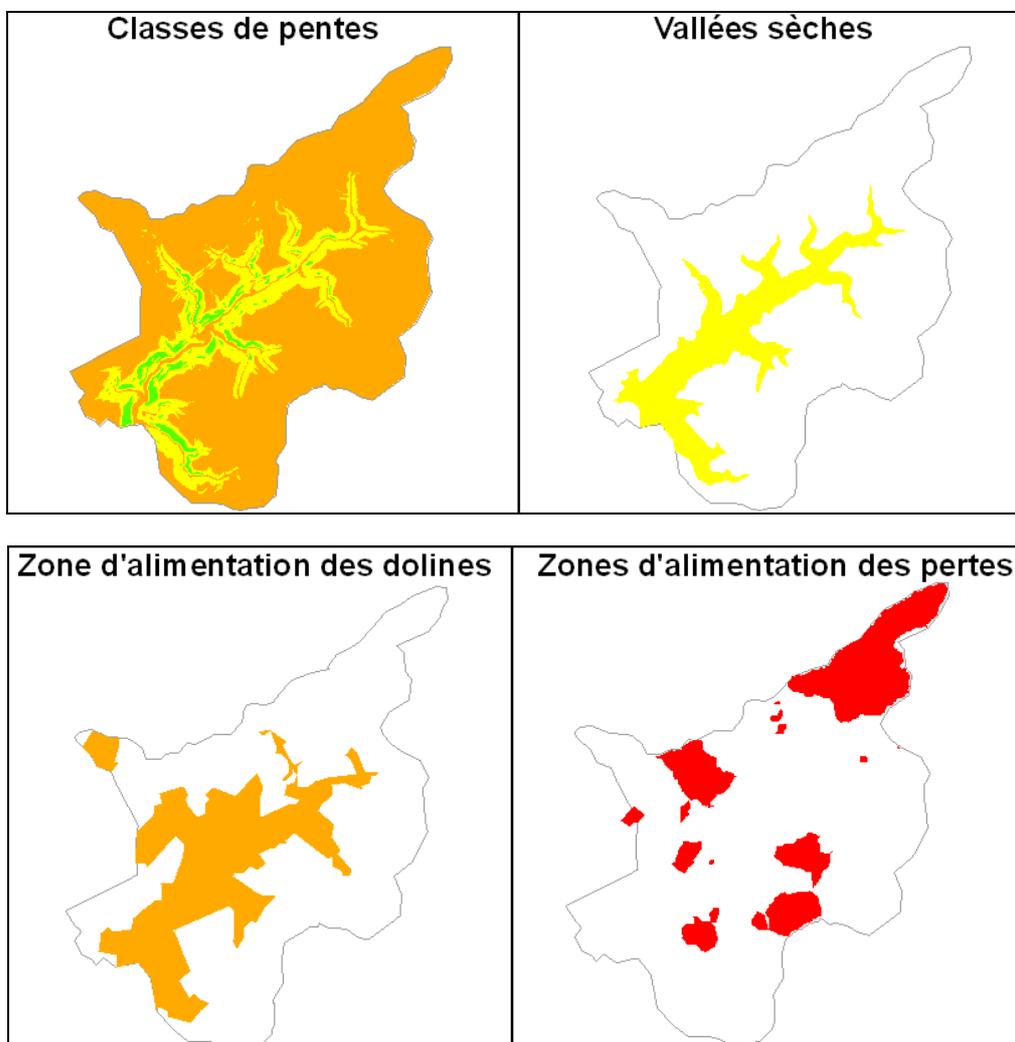


Illustration 22 : Etapes d'élaboration de la carte du critère I « conditions d'infiltration » pour les bassins d'alimentation des captages du Blagour de Chasteaux et du Sorpt

Cas du système karstique de Fontaine sous Préaux

Dans ce cas, la carte des pentes met clairement en évidence que la vulnérabilité maximale à l'infiltration est localisée sur les plateaux, alors que le ruissellement domine dans les vallées. Pour la morphologie karstique, si les bétouilles et leurs bassins d'alimentation sont bien identifiés, la position et le nombre des dolines est largement plus difficile à mettre en évidence à cause d'une couverture forestière très fournie dans cette zone et d'une forte densité de dolines (Leclerc, 2008). La large zone ayant pour indice 13 correspond donc à une accumulation de dolines coalescentes dans ce secteur, sans toutefois de précision quant à leurs limites. La vallée actuelle correspond à une vallée sèche, classée en 12, ayant contribué à l'évacuation des eaux souterraines dans le passé. L'indice le plus vulnérable est conservé en chaque point pour créer la carte I (Illustration 23).



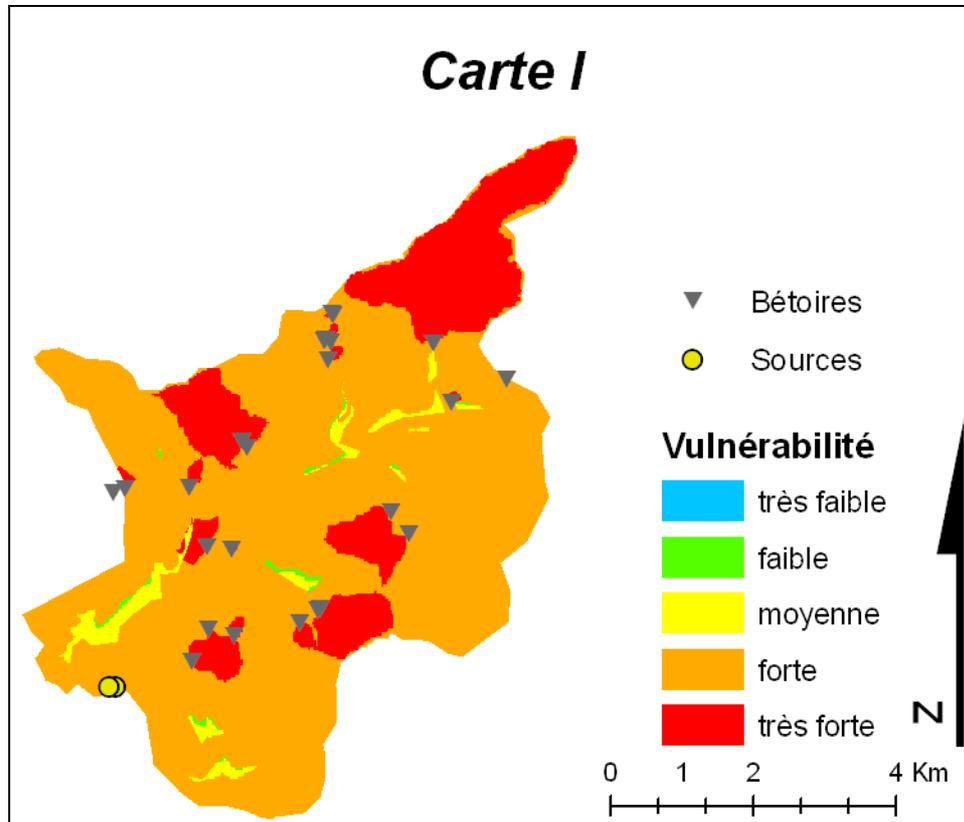


Illustration 23: Etapes de construction de la carte I pour la Fontaine sous Préaux (degré de vulnérabilité de I exprimée)

d. Critère Ka

Le critère Ka « degré de karstification » est défini d'une part :

- en intégrant dans la définition la typologie des systèmes karstiques telle que définie dans le guide Technic'eau de l'AERMC intitulé « Bilan et analyse de la mise en œuvre des procédures de protection des captages AEP en milieu karstique » (2006),
- et d'autre part à partir de caractéristiques relatives à la fonctionnalité du système karstique : classification des systèmes karstiques selon l'analyse des courbes de récession (classification de Mangin), 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.

La typologie des systèmes aquifères karstiques telle que définie dans le guide Technic'eau est rappelée ci-dessous (Illustration 24) :

Critères		Superficie de l'aire d'alimentation (km ²)	
		< 10km ²	> 10km 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 des fortes variations de débit, des vitesses de transit importantes
	Forage hors des principaux axes de drainages – matrice fissuré	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 24 : Classification typologique des captages (modifiée à partir de Technic'eau, Muet et al., 2006)

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 25).

- **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 rapport entre la plus grande valeur de volume dynamique observée sur une grande période et le volume de transit interannuel calculé sur la même période ; une valeur 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) le domaine des systèmes complexes, systèmes généralement de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes ;
- (2) le domaine des 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) le domaine des 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) le domaine des 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) aquifères poreux ou fissurés ou aquifères karstiques non fonctionnels aujourd'hui mais qui ont pu l'être par le passé.

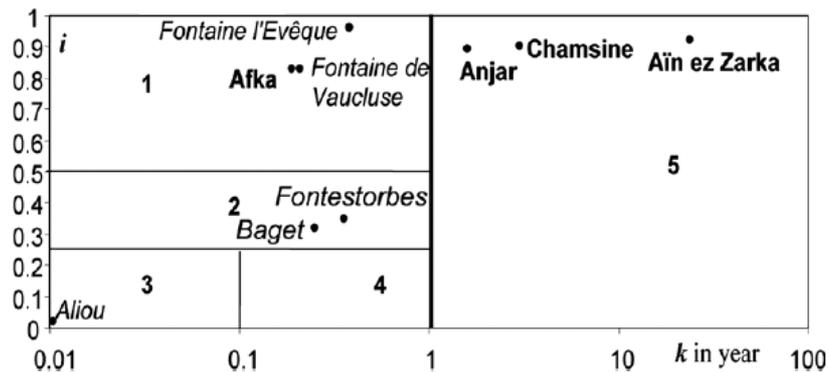


Illustration 25 : Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession [Mangin, 1975] (El Hakim & Bakalowicz, 2007)

Dans le cas, où il n'existe pas de données d'hydrogrammes sur plusieurs cycles hydrologiques, 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 ainsi que le caractère de système karstique unaire ou binaire. Il est recommandé de pouvoir tester deux scénarios, avec deux valeurs du critère K et d'apprécier l'effet sur la vulnérabilité globale.

A noter que si cet indice est de manière générale globalisé à l'échelle du bassin d'alimentation, il peut néanmoins être distingué lorsqu'il est possible de distinguer une partie d'un système karstique ayant un fonctionnement karstique plus intense, identifié notamment à l'aide de résultats d'essais de traçage mettant en évidence des vitesses de transit rapide. Dans ce cas, l'indice d'une telle zone est de 4 (Illustration 26).

Critère	Caractéristiques		Indice	
Ka	Karstification	Ka₁	degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 1 (<10km ² , Q moyen annuel faible) 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
		Ka₂	degré de karstification correspondant soit aux systèmes karstiques de type 2 (> 10 km ²) ou de type 3, unaires et peu fonctionnels (fonctionnalité est appréciée à partir 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).	2
		Ka₃	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 100 m/h). Domaine de référence 2 de la classification de Mangin .	3
		Ka₄	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 évidences à l'aide d'essais de traçage sont importantes (> 100 m/h). Domaines de référence 3 voire 4 de la classification de Mangin .	4

Illustration 26 : Tableau de description de l'indice Ka

- **Exemples de la mise en œuvre du critère Ka**

Cas des systèmes karstiques de Blagour de Chasteaux et du Sorpt (Lot)

La zone d'étude correspond à deux bassins distincts, celui de la source du Blagour de Chasteaux à l'Est et de la source du Sorpt à l'Ouest. La limite entre ces deux systèmes n'est pas précisément fixée mais cependant une différence de fonctionnalité entre ces deux systèmes karstiques existe. Le Blagour de Chasteaux est un système binaire très fonctionnel, au sein duquel des conduits spéléologiques ont pu être reconnus et tracés (Muet, 1985 ; Paris, 2008). Une zone matérialisant la présence de ces conduits est donc classée en Ka4. Le reste du bassin est classé en Ka3, de même que le système du Sorpt qui est unaire et fonctionnel (Illustration 27).

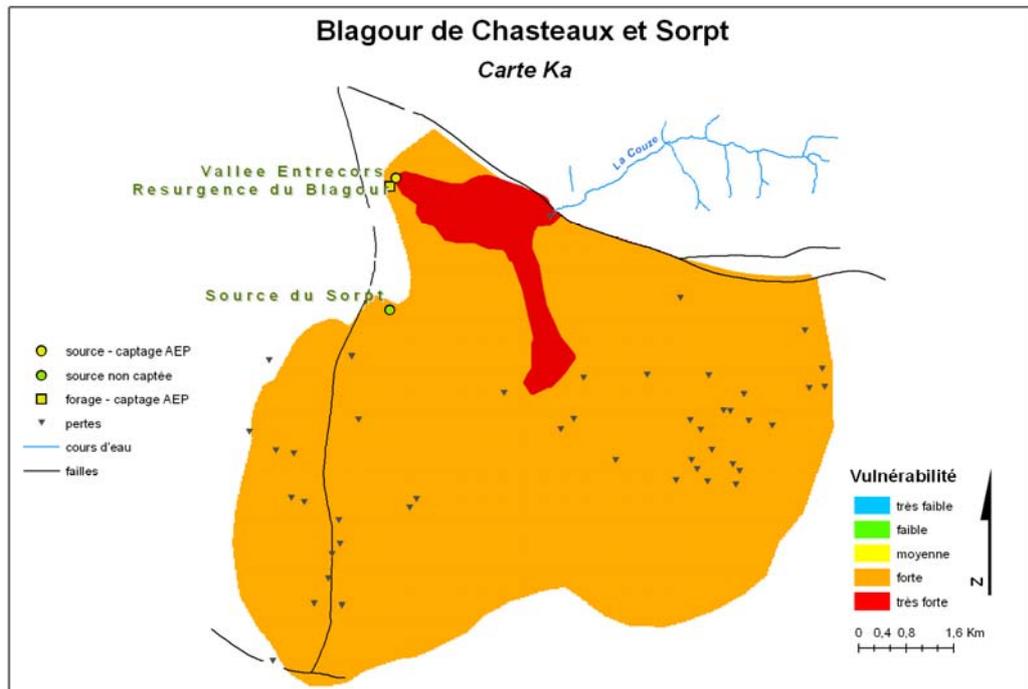


Illustration 27 : Carte du critère Ka du Blagour de Chateaux et du Sorpt (degré de vulnérabilité du critère Ka exprimé)

3.1.2.2. Poids des paramètres et classes de vulnérabilité

Le calcul de l'indice de la vulnérabilité globale V_g se fait sur la base de la formule suivante:

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

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

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 28).

A noter que les exemples d'application donnés dans le chapitre 4 illustre la démarche quant au choix du poids respectifs des différents critères pour la carte finale.

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	Ka	20-30	/

Illustration 28 : Tableau des pondérations pour les différents critères de la méthode PaPRIKa

Pour les bassins versants des pertes, situés en domaine non karstique, seuls les critères P et I sont pris en compte avec une pondération équivalente ($0.5 P + 0.5 I$) au niveau de la carte de vulnérabilité résultante.

3.1.2.3. Reclassification de V_g

Cinq classes sont ensuite calculées à partir du calcul de V_g . La valeur finale de vulnérabilité varie donc entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale) (Illustration 29).

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. Les classes ne seront pas générées automatiquement avec les options proposées dans les logiciels de SIG. L'objectif de la méthode PaPRIKa est de permettre une comparaison entre sites, certains seront fortement vulnérables et d'autres moins, reflétant la combinaison des critères.

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

Illustration 29 : Tableau des classes de vulnérabilité globale

3.2. CRITERES ADDITIONNELS POUR CARTES SERVANT DE BASE A LA DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION

La méthode **PaPRIKa** telle que décrite précédemment permet d'obtenir une carte de la vulnérabilité de la ressource (**PaPRIKa_{ressource}**). Cette carte sera systématiquement réalisée et présentée parallèlement à une **carte complémentaire (PaPRIKa_{captage}) permettant d'évaluer la vulnérabilité de la source ou du forage capté vis-à-vis des pollutions accidentelles.**

Les principes de réalisation de cette carte complémentaire sont les suivants :

- le principe et les définitions de la méthode PaPRIKa sont conservés,
- les cartes **P, R et Ka sont conservées telles quelles,**
- la vulnérabilité du captage face aux pollutions accidentelles dépend des possibilités d'infiltration concentrée et de la vitesse des écoulements dans le réseau de conduits souterrains. Nous proposons donc de réaliser une nouvelle carte I (**I_{captage}**) synthétisant l'ensemble de ces informations :
 - la carte I de PaPRIKa est conservée en fond de carte ;
 - à partir d'une analyse critique des données de traçages artificiels disponibles, les vitesses d'écoulement souterrain vers le captage sont estimées, en considérant le plus de directions dans l'espace en fonction des données. En vertu du principe de précaution, les traçages réalisés en période de hautes eaux et pour lesquels les taux de restitution sont significatifs seront retenus en priorité, l'idée étant de représenter les vitesses d'écoulement les plus rapides ;
 - pour chacune des directions renseignées depuis le captage, la distance correspondant à un temps de transit donné est calculée pour un « **délai d'intervention** » vis-à-vis de la distribution d'eau en cas de pollution accidentelle. Plusieurs délais peuvent être retenus, des tests avec 12h, 24h, 36h et 48h ont été réalisés. Une ou plusieurs « **isochrones** » autour du captage sont tracées. La forme des isochrones est fonction de la géométrie du réseau de drainage souterrain du système karstique (un ou plusieurs drains à l'amont de la source, degré de développement des drains) ainsi que du nombre et de la qualité des traçages disponibles ;
 - à l'intérieur de la zone définie entre le captage et l'isochrone : (i) tous les éléments classés en très vulnérables (I4) préalablement (pertes et leur bassin d'alimentation) sont conservés, (ii) les **conduits souterrains** connus ou supposés en fonction des données de traçages sont **représentés par des zones classées en I4** (une zone tampon d'environ 200 m est retenue en surface, elle est étendue aux points d'infiltration concentrée situés à proximité latéralement à cette zone), (iii) dans le cas de perte d'un cours d'eau localisée dans cette zone, **le**

réseau aérien et une zone tampon de 50 m sont classés en I4 sur une distance correspondant à un total de 24 ou 48h. Dans ce cas, on est appelé à utiliser 2 vitesses différentes : une correspondant à la vitesse des écoulements souterrains (estimée par traçage) et une deuxième de l'ordre de 150 à 200 m/h pour les écoulements aériens ;

- en revanche, en dehors de cette zone définie par les isochrones, tous les éléments « I4 » sont dégradés en I3, car considérés moins vulnérables par rapport au captage dans le cadre du délai d'intervention retenu .
- l'application de la méthode PaPRIKa et la **pondération des 4 cartes est conservée à l'identique entre les deux scénarios « ressource et source »**. L'idée est de conserver le rôle des autres éléments influençant la vulnérabilité intrinsèque (protection, nature de la roche, degré de karstification). On obtient une nouvelle carte (ou plusieurs selon les isochrones retenues) centrée sur le captage représentant la vulnérabilité aux pollutions accidentelles rapides.

Cette carte finale de vulnérabilité de la source ou du captage constitue une base pour déterminer les périmètres de protection du captage. La délimitation des périmètres de protection doit s'effectuer à l'échelle adaptée, soit à l'échelle cadastrale (1/2000 ou 1/5000). Le passage à cette échelle nécessitera de faire des choix pour affiner le contour des zones de vulnérabilité très forte à forte qui seront attribuées en périmètre de protection immédiat et /ou rapprochée.

- **Exemples de la mise en œuvre de la carte de vulnérabilité de la source**

Cas des systèmes karstiques du Blagour de Chasteaux et du Sorpt

Pour élaborer la carte I_{captage} , les données de traçage dont l'injection a été réalisée depuis quatre points du bassin et dont la restitution se fait à une des deux sources ont été utilisées (Illustration 30). La carte I_{captage} est réalisée pour chaque sous-bassin (Blagour de Chasteaux et Sorpt).

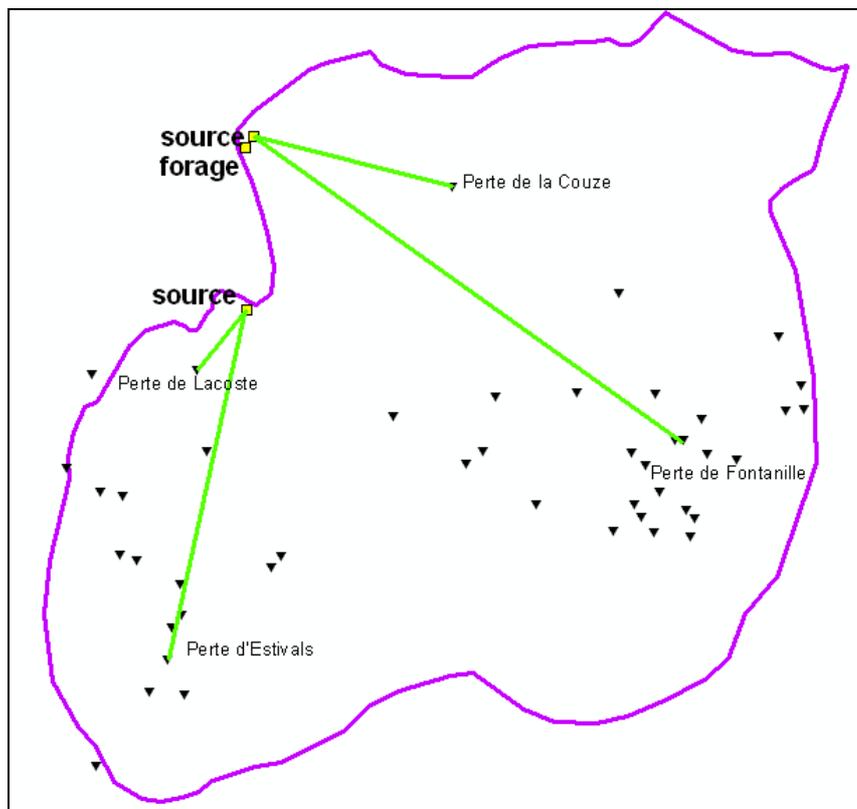


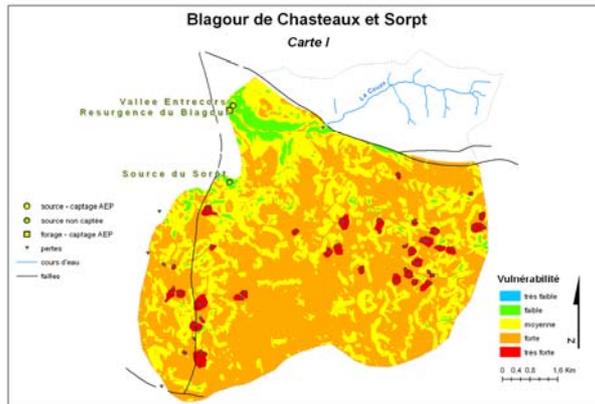
Illustration 30 : Localisation des points d'injection des traçages prises en compte pour les systèmes du Blagour et du Sorpt

Ces données de traçage (Illustration 31) permettent de tracer des isochrones (12h, 24h, 36h, 48h) dont la forme est plus ou moins allongée selon les directions. Les drains karstiques supposés dans ces directions sont représentés par des zones en I4 (Illustration 30 et Illustration 32).

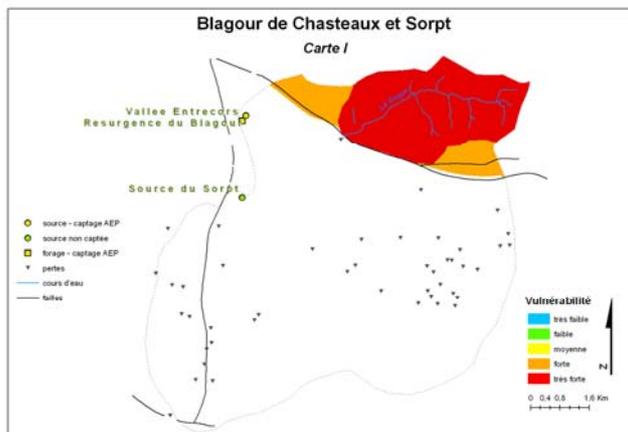
Dans la zone amont de la perte de la Couze, l'indice I4 est maintenu pour une zone tampon de 50 m le long du cours d'eau de la Couze et pour une distance correspondant au temps d'intervention choisi. L'indice I dans le reste du bassin d'alimentation de la perte est dégradé en I3.

Injection	Restitution	Distance	Vitesse	Iso 24h	Iso 48h
Perte de la Couze	Blagour de Chasteaux	2660 m	261,821 m/h	6300 m	12600 m
Perte de Fontanille	Blagour de Chasteaux	7600 m	117,077 m/h	2800 m	5600 m
Perte de Lacoste	Source du Sorpt	1020 m	50,131 m/	1200 m	2400 m
Perte d'Estivals	Source du Sorpt	5130 m	128 m/h	3000 m	6000 m

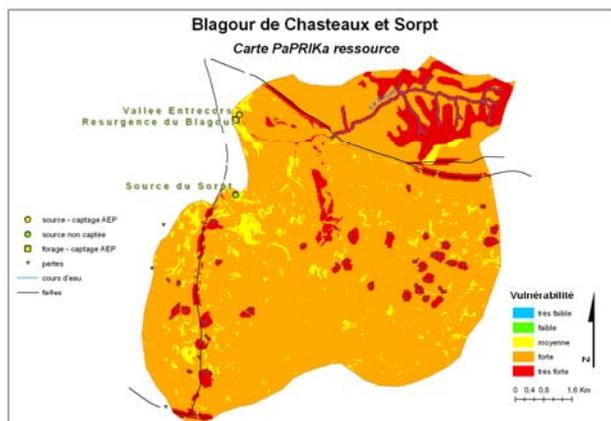
Illustration 31 : Données des essais de traçage pour le Blagour de Chateau et le Sorpt (Muet, 1985).



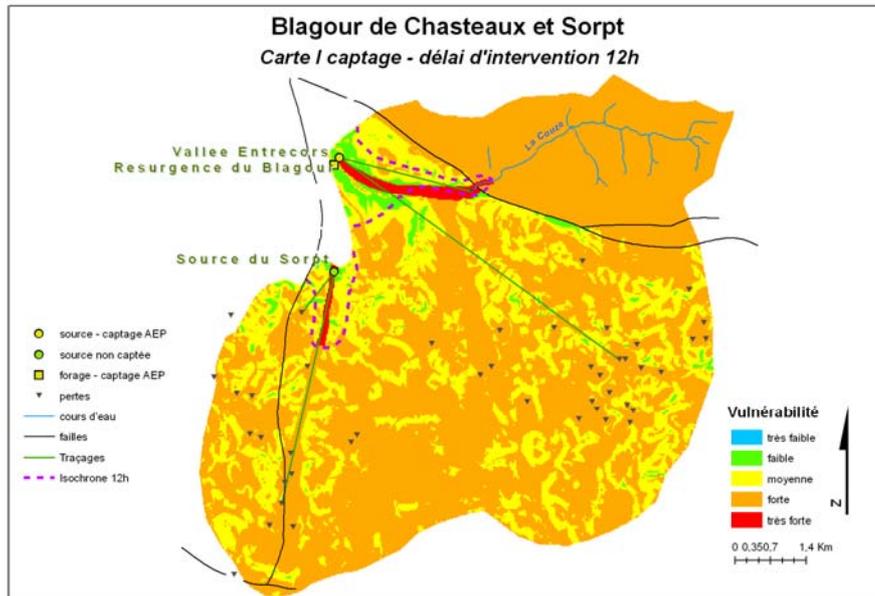
Carte I du bassin d'alimentation



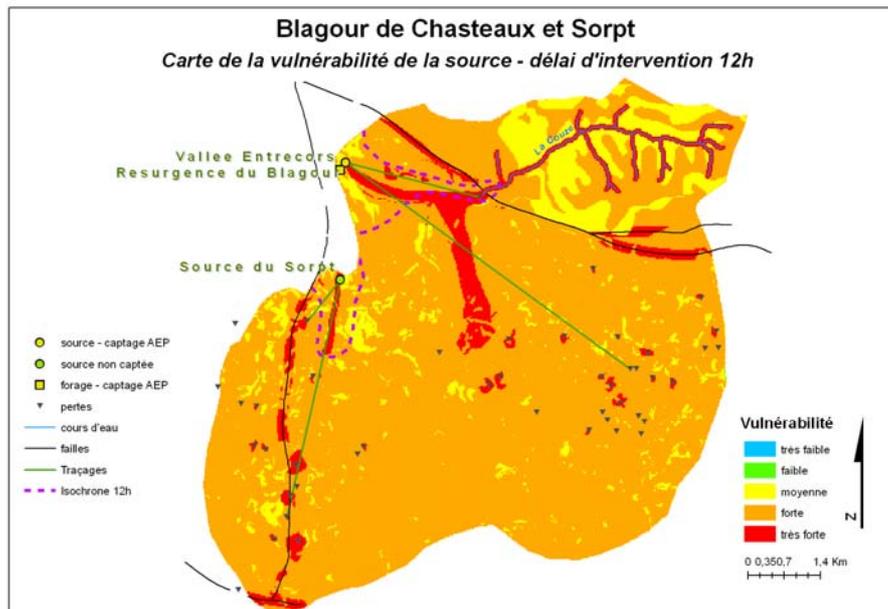
Carte I du bassin des pertes



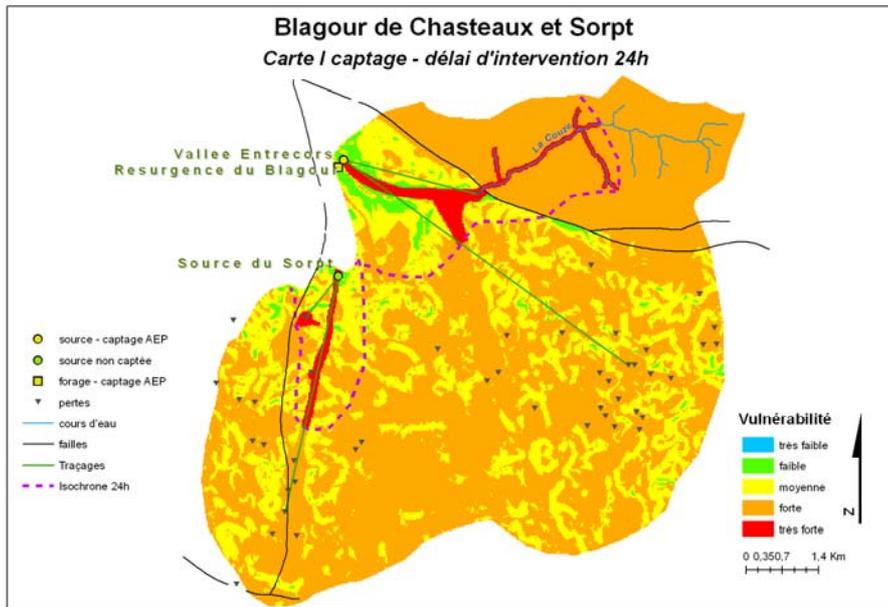
Carte de vulnérabilité de la Ressource



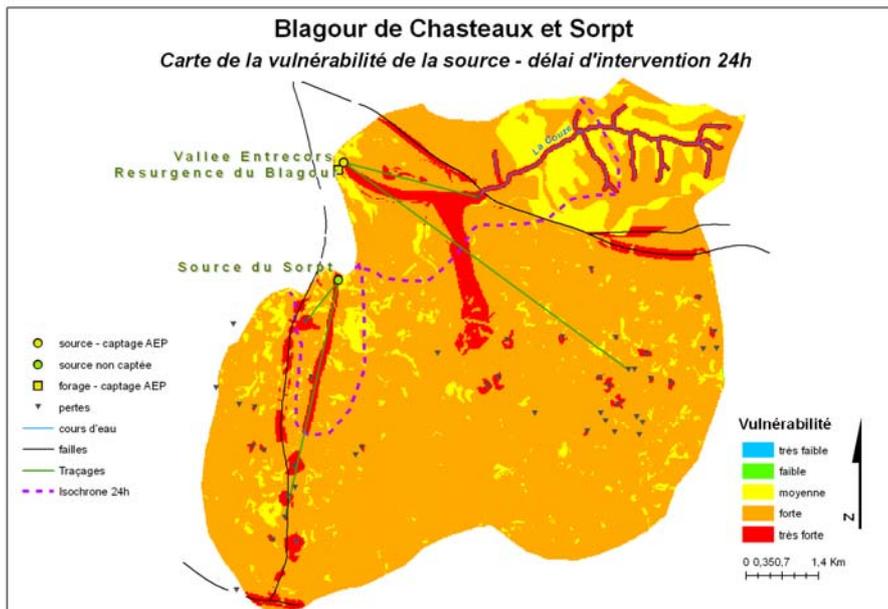
Carte I captage – délai d'intervention de 12h



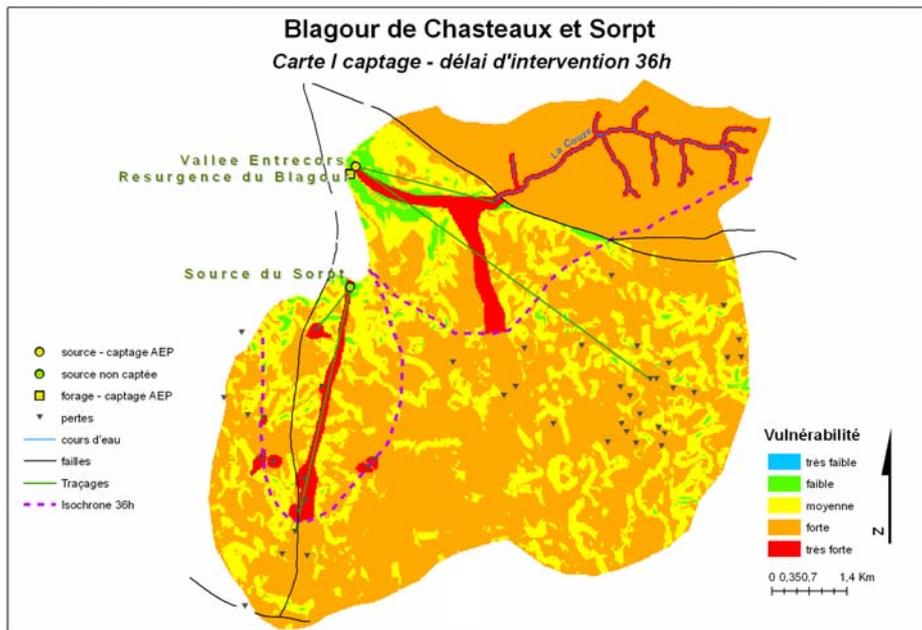
Carte de vulnérabilité de la source –délai d'intervention de 12h



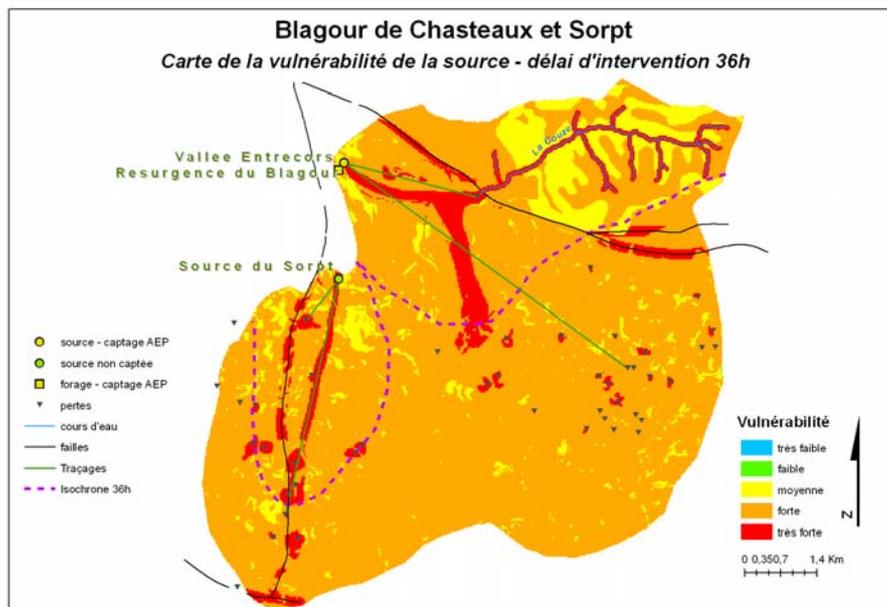
Carte I captage – délai d'intervention 24h



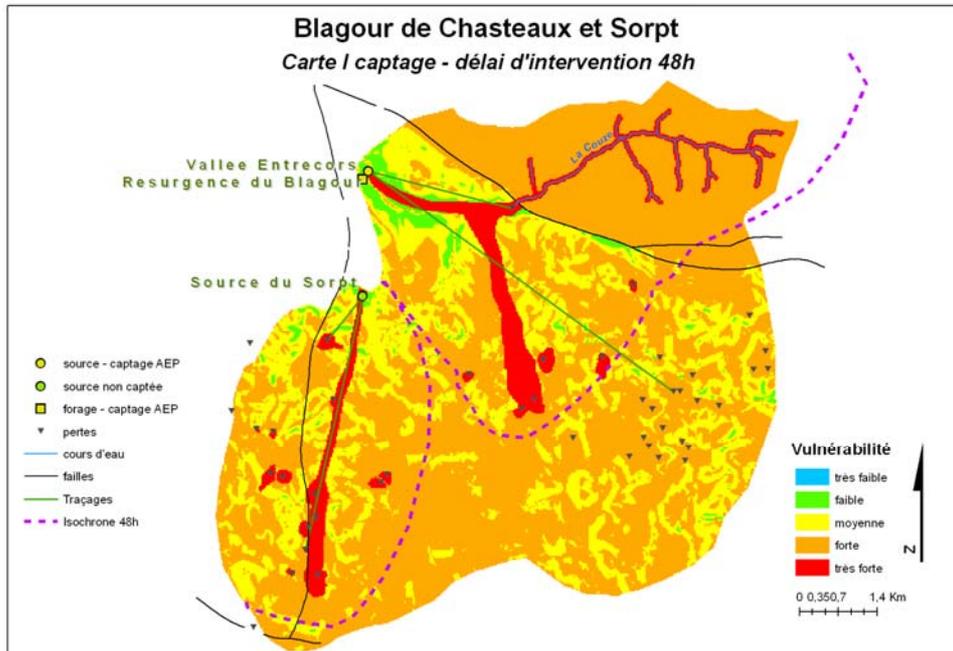
Carte de la vulnérabilité de la source – délai d'intervention 24h



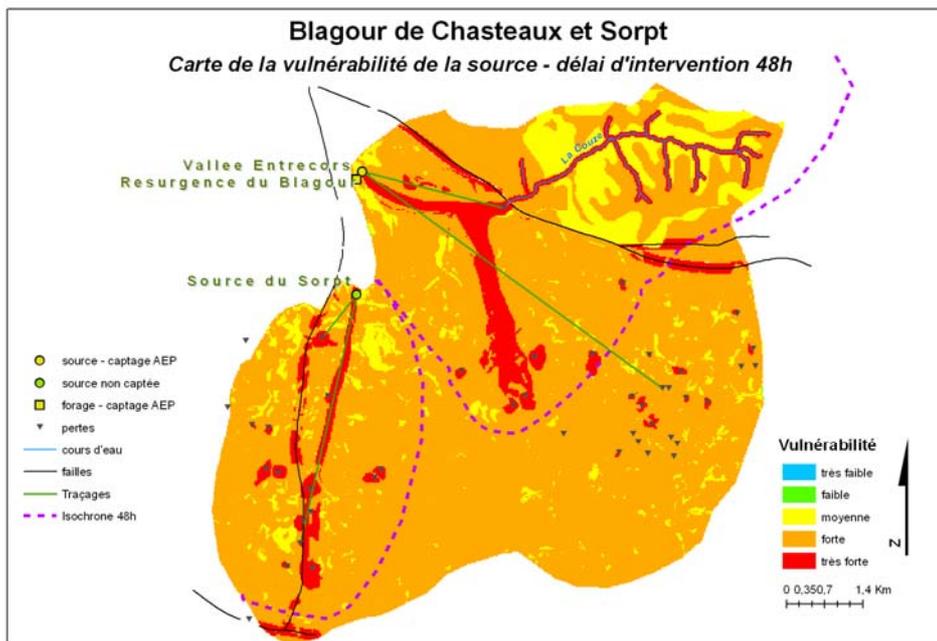
Carte I captage – délai d'intervention de 36h



Carte de vulnérabilité de la source – délai d'intervention de 36h



Carte I captage – délai d'intervention de 48h



Carte de vulnérabilité de la source – délai d'intervention de 48h

Illustration 32 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque de la source ou des captages du système karstique du Blagour de Chasteaux.

Les cartes de vulnérabilité intrinsèque de la source pour les deux captages du Sorpt et du Blagour, obtenues en prenant en considération le temps de transit dans les eaux souterraines et donc un délai d'intervention en cas de pollution accidentelle, permettent de proposer différents scénarios pour des temps d'intervention compris entre 12 et 48h. Plus le délai d'intervention est important, plus les secteurs vulnérables sont étendus le long des directions d'écoulement principales mises en évidence par les essais de traçage et le long de conduits reconnus partiellement ou présumés. La carte résultante indique une vulnérabilité moyenne dominante pour ces deux systèmes karstiques, mais néanmoins permettant de différencier des zones de plus forte vulnérabilité, résultat de la combinaison de la structure et du fonctionnement du système karstique. Les zones de forte vulnérabilité correspondent d'une part à des points d'infiltration ponctuelles (dolines ou groupe de dolines), à des zones tampons autour des cours d'eau qui s'infiltrent au niveau de perte (bassin versant des pertes situé en dehors de l'impluvium karstique) et d'autre part, aux zones où dans la verticalité l'existence de conduits karstiques est supposée. Les périmètres de protection immédiats concerneront le captage, ainsi que des zones de forte vulnérabilité au sein du bassin d'alimentation. Les périmètres de protection rapprochée pourront correspondre aux zones de très forte vulnérabilité au droit des conduits karstiques reconnus ou supposés, le reste du bassin pouvant se rapporter au périmètre de protection éloignée.

4. Exemples d'application



4.1. CAS D'UN KARST DE PLATEAU – SYSTEME KARSTIQUE DE L'OUYSSSE (LOT)

Le bassin de l'Ouyssse est un grand système karstique (590 km²) situé dans la partie septentrionale du causse de Gramat, dans le département du Lot. Une description détaillée du site et de l'application de la méthode **PaPRIKa** sur celui-ci est donnée dans Kavouri (2008) et Kavouri et al. (2009).

Le bassin peut être subdivisé en deux zones en fonction de la nature de son impluvium : la partie occidentale et centrale est constituée par des roches carbonatées et la partie orientale représente un bassin superficiel connexe au réservoir karstique. Cette seconde partie est très étendue (154km²) et elle contribue à environ 1/5^{ème} du débit des sources. Pour cette raison, l'ensemble de l'impluvium de l'Ouyssse a été considéré lors de la cartographie de la vulnérabilité. Ainsi, pour la zone connexe au réservoir carbonaté, seuls les critères I et P sont cartographiés, caractérisant les propriétés physiques et hydrogéologiques de la surface et de la sub-surface. Les critères Ka et R ne sont pas renseignés pour cette partie, vu qu'il n'y a pas de réservoir karstique.

4.1.1. Vulnérabilité de la ressource

Critère P :

- **Pour le réservoir karstique**

Le critère P est composé de 4 facteurs : l'état de surface, la zone non saturée, l'épikarst et le sol (Illustration 33).

L'état de surface

Le bassin d'alimentation de la perte de Bramarie dans le SW ainsi que la vallée de l'Alzou au Nord sont des zones de drainage superficiel. L'ensemble du bassin de Bramarie et une zone tampon de 50 m autour du ruisseau de l'Alzou sont classés en P4.

La ZNS

La plupart des étages géologiques constituant la ZNS sont représentés par des calcaires et sont indexés en **ZNS_3**. En revanche, les formations de Cajarc

(alternances de calcaire avec des niveaux argileux sur environ 120 m), peuvent constituer un niveau qui retarde l'infiltration et protège le réservoir. L'indice **ZNS_2** est donc attribué à l'ensemble de la zone où cette formation se trouve au-dessus du niveau piézométrique. L'épaisseur de la ZNS est supérieure à 50 m dans toute la superficie du bassin à l'exception des vallées. Les failles principales susceptibles d'influencer les écoulements, sont classées en vulnérabilité **ZNS_4**.

L'aquifère épikarstique

Il 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

Il est très peu présent sur ce bassin, essentiellement accumulé dans les dépressions. 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).

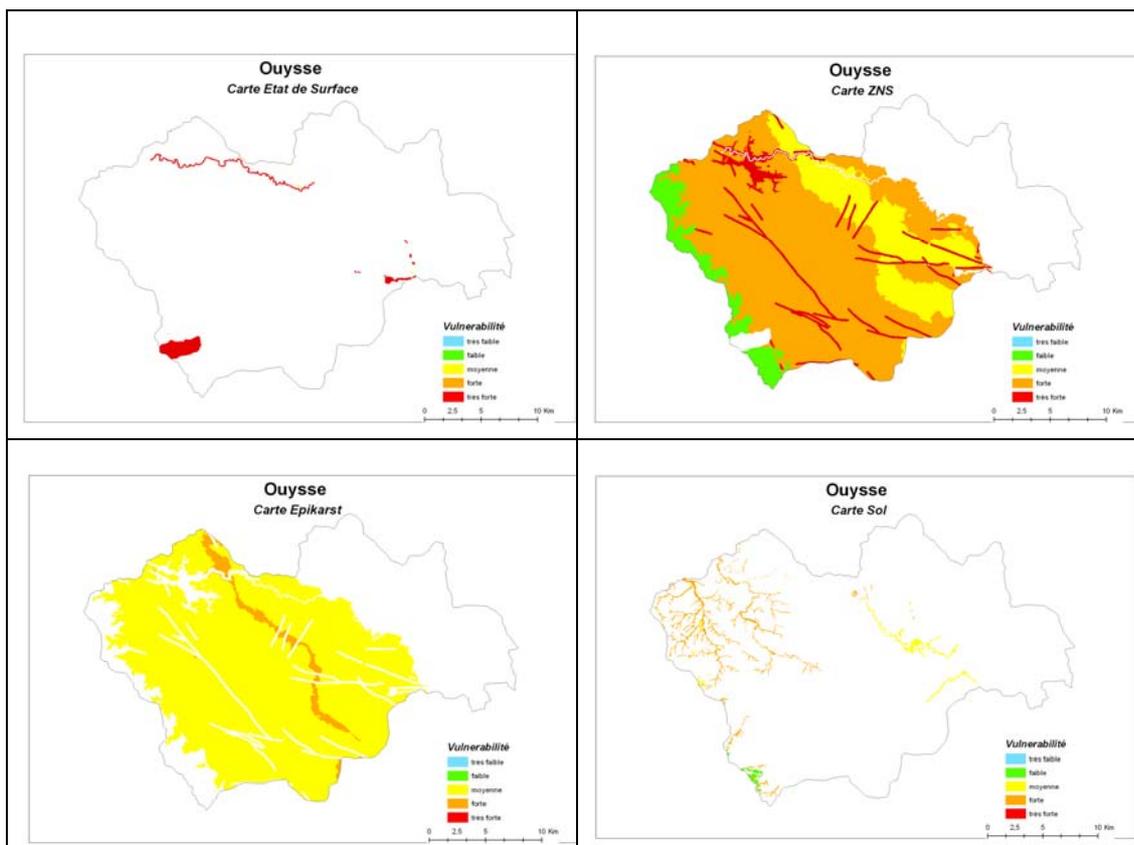


Illustration 33 : Cartes des quatre facteurs : Etat de surface, ZNS, Epikarst et Sol du critère P pour le système karstique de l'Ouyse (Lot) – impluvium karstique.

- **Pour l'amont non carbonaté du bassin (zone connexe au réservoir)**

Le critère P est caractérisé par un seul paramètre, l'état de surface. Ainsi, le long des cours d'eau et sur une zone tampon de 50 m un indice de très forte vulnérabilité **P4** a été attribué. C'est également le cas pour les zones d'affleurement des formations argileuses imperméables. L'indice **P3** est attribué aux formations métamorphiques et l'indice **P2** aux formations carbonatées karstiques (Illustration 34).

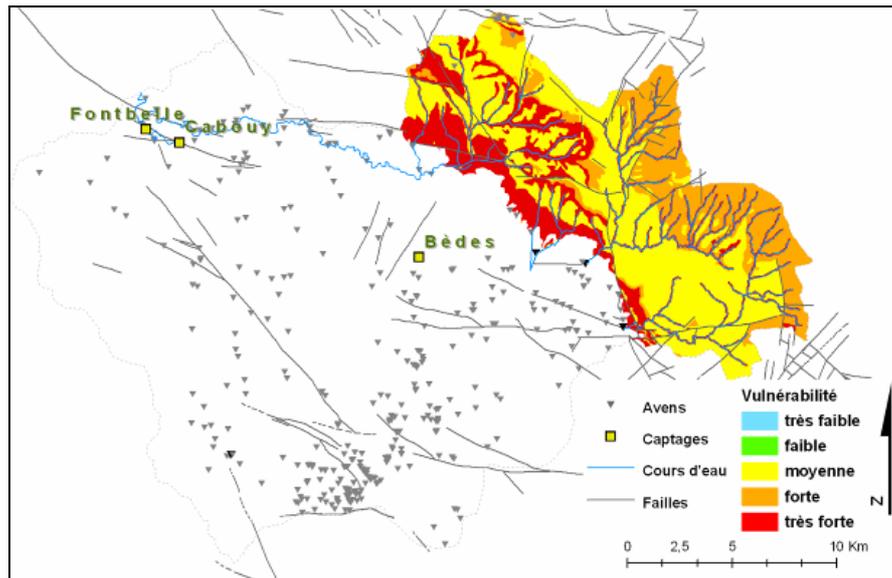


Illustration 34 : Carte P de l'impluvium non karstique du système karstique de l'Ouyse (Lot)

Critère R :

Le réservoir karstique se développe dans les différents étages litho stratigraphiques de la série carbonatée grâce à sa structure monoclinale vers le SW. 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.

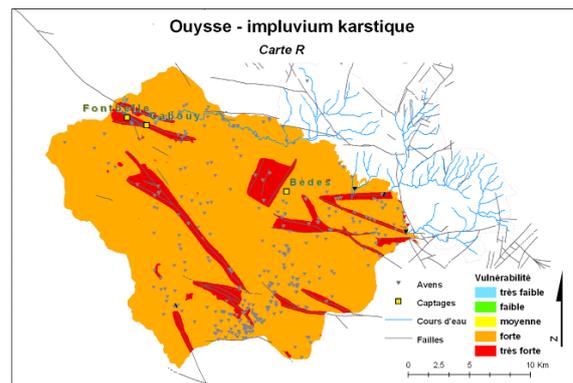


Illustration 35 : Carte du critère R du système karstique de l'Ouyse (Lot) - impluvium karstique

De plus, les conduits karstiques cartographiés et les accidents tectoniques sont indexés en très forte vulnérabilité **R4**. (Illustration 35).

Le critère I :

L'indice de très forte vulnérabilité **I4** est attribué aux pertes et à leurs bassins d'alimentation. Les régions ayant une forte densité d'avens sont agrégées (ex. forêt de la Braunhie). La partie indexée en **I3** correspond à des zones représentées par de nombreuses dolines. Enfin, les vallées sèches sont classées en vulnérabilité moyenne **I2**.

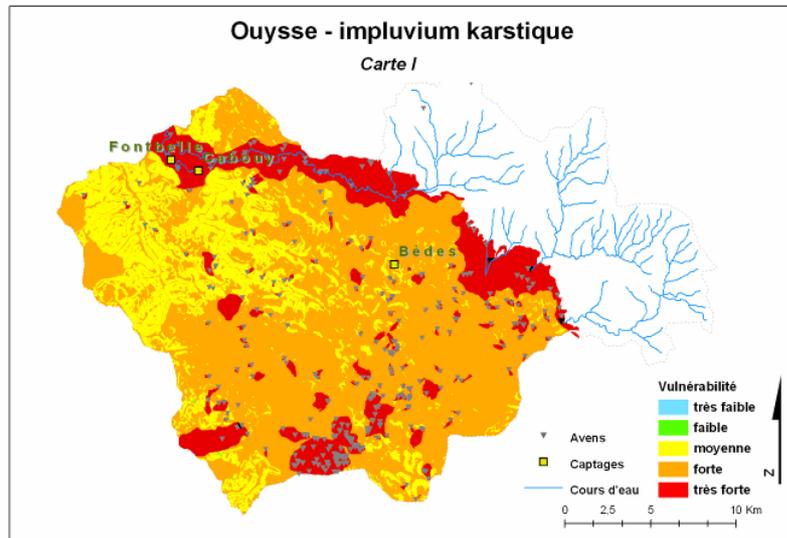


Illustration 36 : Carte du critère I de l'impluvium karstique du système karstique de l'Ouyse (Lot)

La topographie étant moyennement marquée dans cette région, la carte I est dominée par la morphologie karstique, la carte des pentes est masquée (Illustration 36).

- **Pour la zone amont des pertes (zones connexes au réservoir)**

L'ensemble de cette zone est classé très fortement vulnérable **I4** parce qu'elle correspond au bassin d'alimentation des points d'infiltration concentrée. En effet, les circulations aériennes de cette partie sont en totalité drainées par les pertes pérennes de Thémines, Théminettes, Issedolus à l'Est du bassin et par le ruisseau de l'Alzou dans le Nord. (Illustration 37).

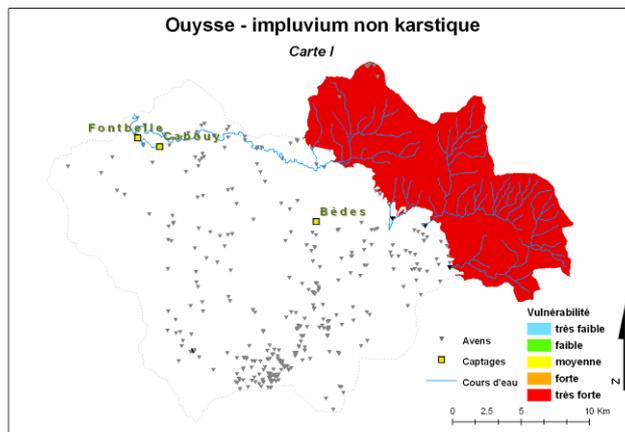


Illustration 37 : Carte I de l'impluvium non karstique du système karstique de l'Ouyse (Lot)

Critère Ka :

- **Pour le réservoir karstique**

Ce critère est aussi renseigné exclusivement pour la partie du réservoir karstique. L'Ouyse est un système karstique binaire, fonctionnel à très fonctionnel et ayant un réseau de conduits très développé. Cependant, en raison de la grande extension du bassin, le caractère binaire n'a pas été attribué à l'ensemble du système. Ainsi, les zones qui sont représentées par des écoulements souterrains très rapides sont indexées en **K4**.

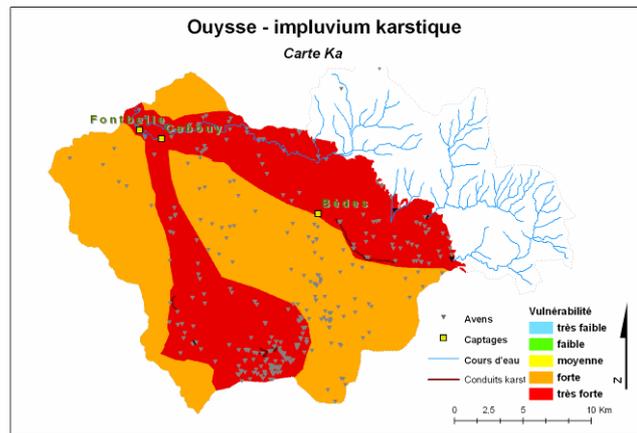
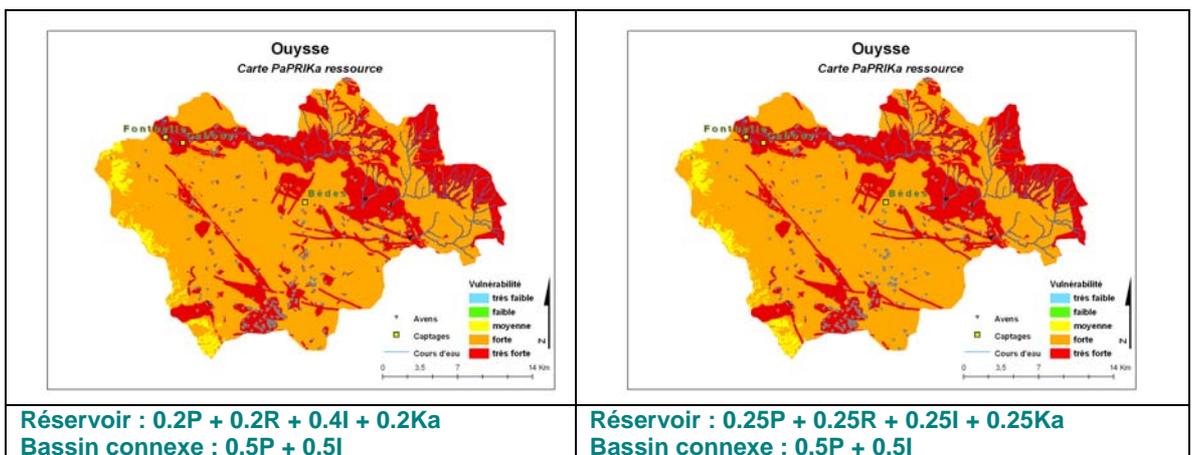


Illustration 38 : Carte du critère Ka de l'impluvium karstique du système karstique de l'Ouyse (Lot)

Ces zones sont : i) la partie est qui comprend la rivière souterraine des Vitarelles et qui draine également le bassin superficiel non karstique et ii) la partie sud qui est drainée par les rivières souterraines de Lacarière et de Viazac (Illustration 38).

Carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource

Six tests de pondération ont été effectués en respectant la gamme proposée dans le chapitre 3.



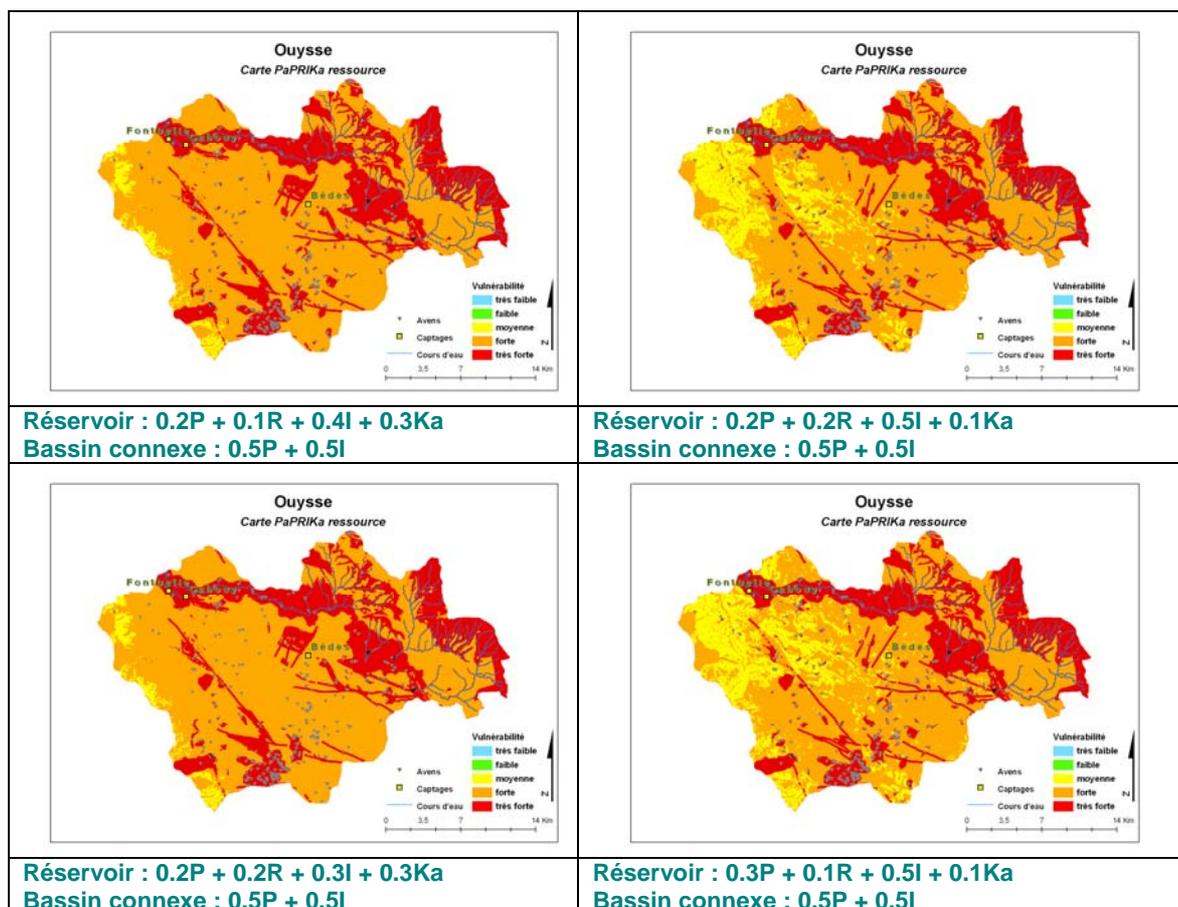


Illustration 39 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque de la ressource pour le Système karstique de l'Ouysses (Lot)

Quel que soit le scénario retenu, les zones très vulnérables (Vg4) sont identiques. Quelques différences sont à noter en particulier dans la partie occidentale du bassin, où la vulnérabilité oscille entre forte (orange) à moyennement forte (jaune). Dans tous les cas, les zones les plus vulnérables sur lesquelles il faudra accentuer la vigilance en termes de protection sont mises en évidence sans ambiguïté (Illustration 39).

4.1.2. Vulnérabilité des captages

La cartographie de la vulnérabilité des captages du système karstique de l'Ouysses est réalisée séparément pour les aires d'alimentation des différents captages : forage de Bèdes, sources de Cabouy et de Fontbelle. Le tracé des sous-bassins est effectué pour les besoins de cette étude, il est basé sur des données géologiques, topographiques et des essais de traçages artificiels (Illustration 40 et Illustration 41).

Injection	Restitution	Distance	Vmax	Isochrone
Pertes de Thémines	Besaces	7900 m	263 m/h	12h : 2000 m 24h : 4000 m 36h : 6000 m 48h : 8000 m
Pertes de Théminettes	Besaces	10300 m	225 m/h	12h : 2700 m 24h : 5400 m 36h : 8100 m 48h : 10800 m
Alzou	Cabouy	7000 m ?	54 m/h	12h : 640 m 24h : 1270 m 36h : 1910 m 48h : 2540 m
Vitarelles	Cabouy	12700	140 m/h	12h : 2000 m 24h : 4000 m 36h : 6000 m 48h : 8000 m
Igue de Bugadous-le Cornouiller	Cabouy	16250 m	67 m/h	12h : 800 m 24h : 1600 m 36h : 2400 m 48h : 3200 m
Croise basse	Fontbelle	7700 m	48 m/h	12h : 650 m 24h : 1300 m 36h : 1950 m 48h : 2600 m
Fossé de Aynet	Fontbelle	10500 m	47 m/h	12h : 650 m 24h : 1300 m 36h : 1950 m 48h : 2600 m
Forage de Fournet	Fontbelle	3000 m	21 m/h	12h : 250 m 24h : 500 m 36h : 750 m 48h : 1000 m
Forage de la Combe des prés	Fontbelle	2900 m	21 m/h	12h : 250 m 24h : 500 m 36h : 750 m 48h : 1000 m
Forage de la Dame de St Projet	Fontbelle	5000 m	25 m/h	12h : 300 m 24h : 600 m 36h : 900 m 48h : 1200 m
Perte de la Bramarie	Fontbelle	16300 m	255 m/h	12h : 3050 m 24h : 6100 m 36h : 9150 m 48h : 12200 m

Illustration 40 : Tableau des essais de traçage du système karstique de l'Ouyssse

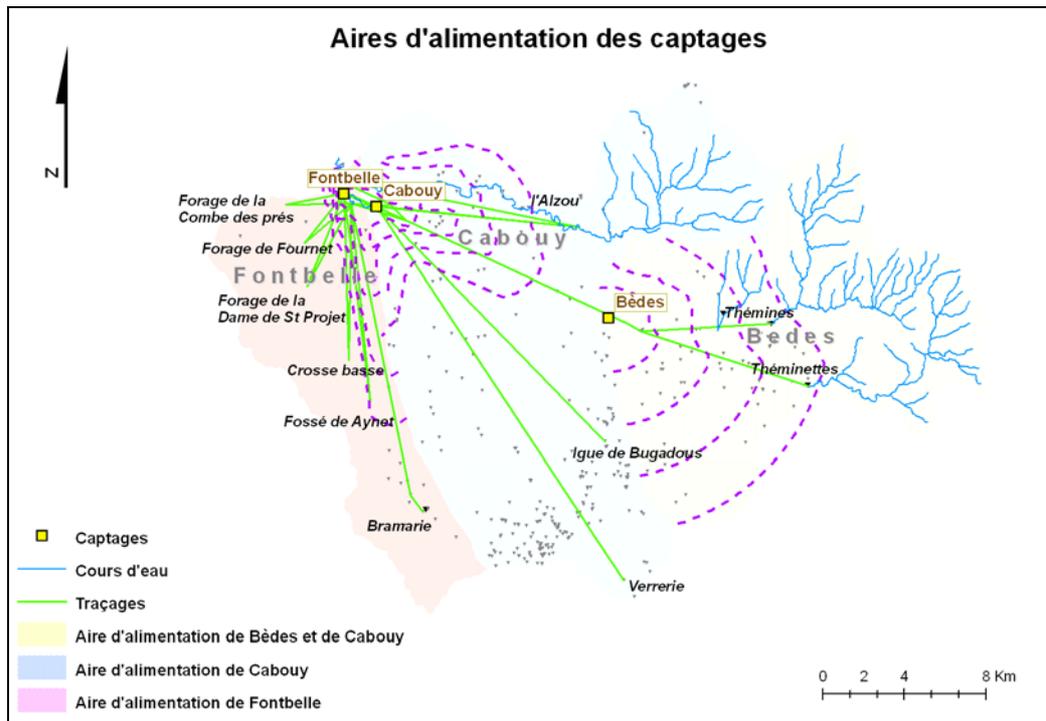
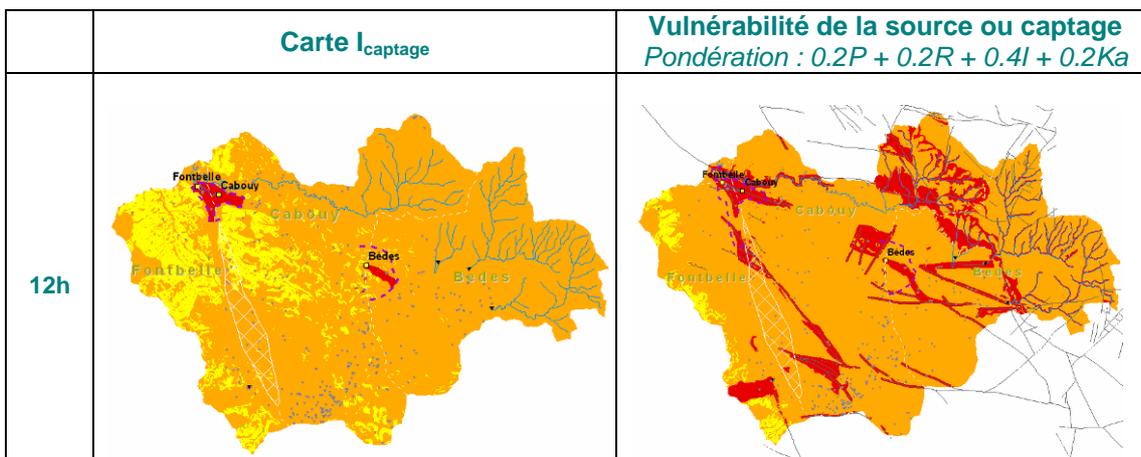


Illustration 41 : Carte des aires d'alimentation des captages du système karstique de l'Ouyse (Lot) (les lignes en pointillé violet correspondent aux isochrones)

Quatre cartes I_{capture} ont été réalisées en traçant les isochrones à 12h, 24h, 36h et 48h basées sur les vitesses des traçages. Les conduits souterrains supposés ont été identifiés par des zones très vulnérables sur ces cartes. Des cartes détaillées par bassin d'alimentation des captages sont données à titre d'illustration pour deux isochrones, à savoir 12h et 48h.

Ces nouvelles cartes I ont été pondérées par les cartes des trois autres critères pour donner des cartes de vulnérabilité de chaque captage en fonction de différents délais d'intervention (Illustration 42).



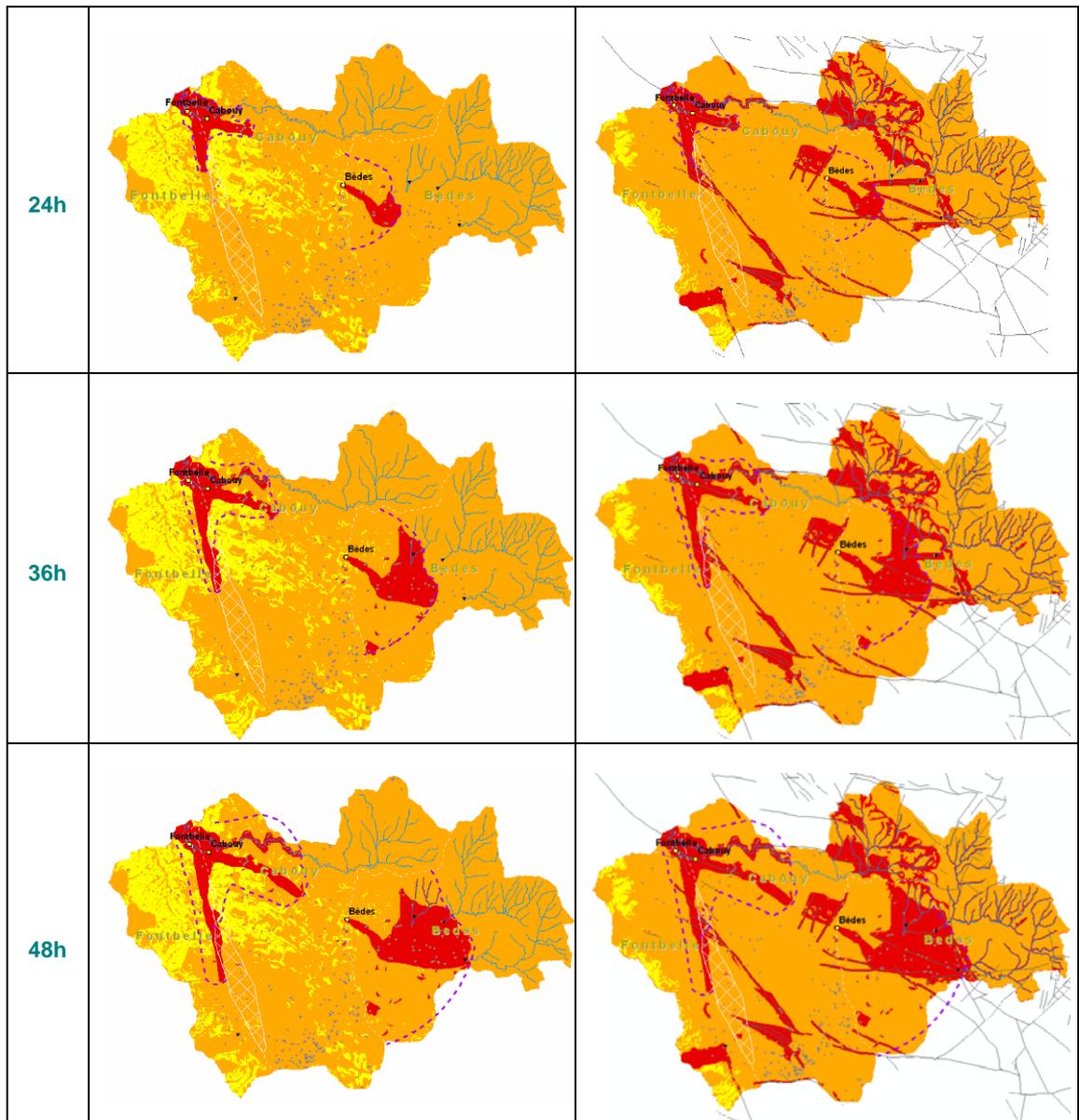


Illustration 42 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque des trois captages du système karstique de l'Ouyse.

Les cartes de vulnérabilité intrinsèque du captage ou de la source obtenues en prenant en considération des temps d'intervention compris entre 12 et 48h pour les captages d'eau potable du système karstique de l'Ouyse permettent de définir des zones de forte vulnérabilité à protéger de manière prioritaire, à l'aide soit du périmètre de protection immédiat ou rapprochée en fonction de leur localisation par rapport à l'isochrone déterminée. Le reste du bassin d'alimentation est de vulnérabilité moyenne. Des cartes de vulnérabilité intrinsèque de la source pour les différents captages pour les délais d'intervention de 12h et 48h sont données en annexe 4 (zoom sur les bassins propres à chaque source captée).

4.2. KARST DE MONTAGNE

Le site qui a été retenu pour illustrer le cas des karsts en montagne est le petit système karstique de la Fontaine d'Orbe. Il est localisé dans les calcaires crétacés (urgoniens) des chaînons béarnais (64). Il est largement décrit dans Rey (2007) et Jaunat et al. (2008).

4.2.1. Vulnérabilité de la ressource

Critère P

Pour le site de la Fontaine d'Orbe, il n'a pas été nécessaire de renseigner le critère Etat de Surface, du fait qu'aucune zone de ruissellement vers une perte n'est observée dans la zone d'étude.

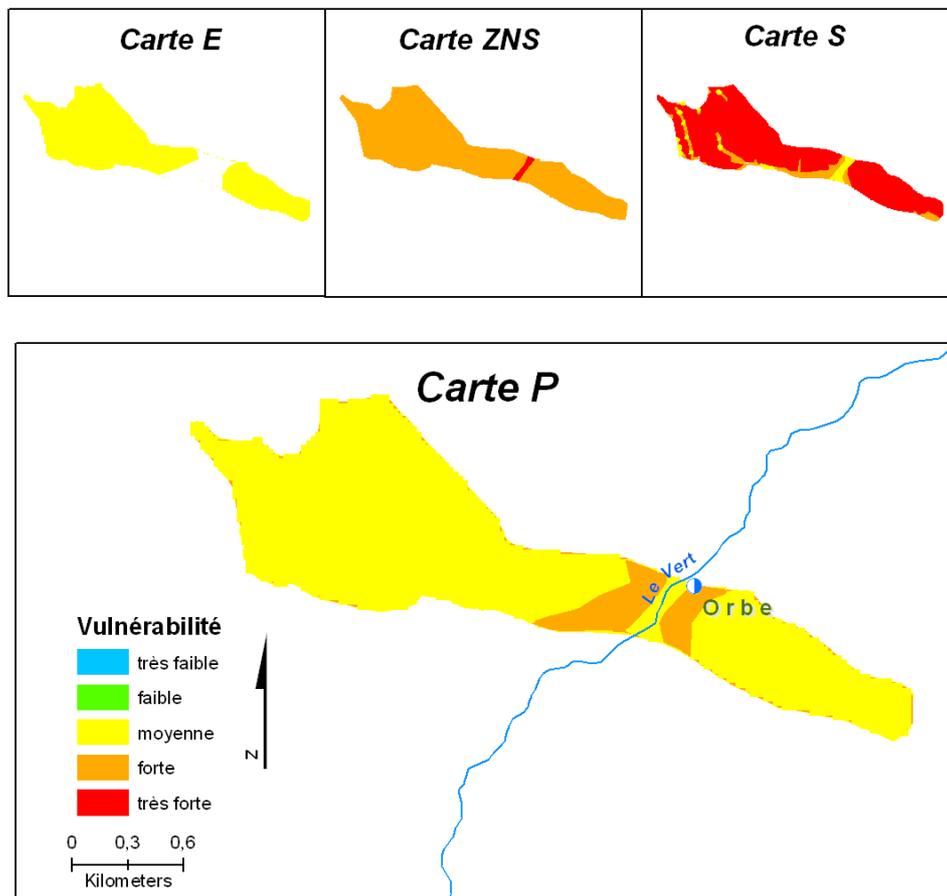


Illustration 43 : Carte du critère P à partir des facteurs E, ZNS et S du système karstique de la Fontaine d'Orbe.

Selon la lithologie et le degré de fracturation de la zone non saturée l'indice **ZNS=3** a été attribué (calcaires en bancs massifs affectés d'une importante fracturation). L'épaisseur de la ZNS est supérieure à 50 m dans toute la superficie du bassin, à l'exception de la vallée du Vert (**ZNS=4**).

Pour l'aquifère épikarstique, l'indice **E2** est attribué sur l'ensemble du bassin, à l'exception des zones déprimées dans lesquelles il n'est pas caractérisé.

Le sol est rare et peu développé sur le bassin d'alimentation (**S4**). Lorsqu'il est présent, il s'accumule au fond des dépressions et de la vallée (**S2**). Son épaisseur est moins importante sur les bords des zones déprimées (**S3**).

Le critère R

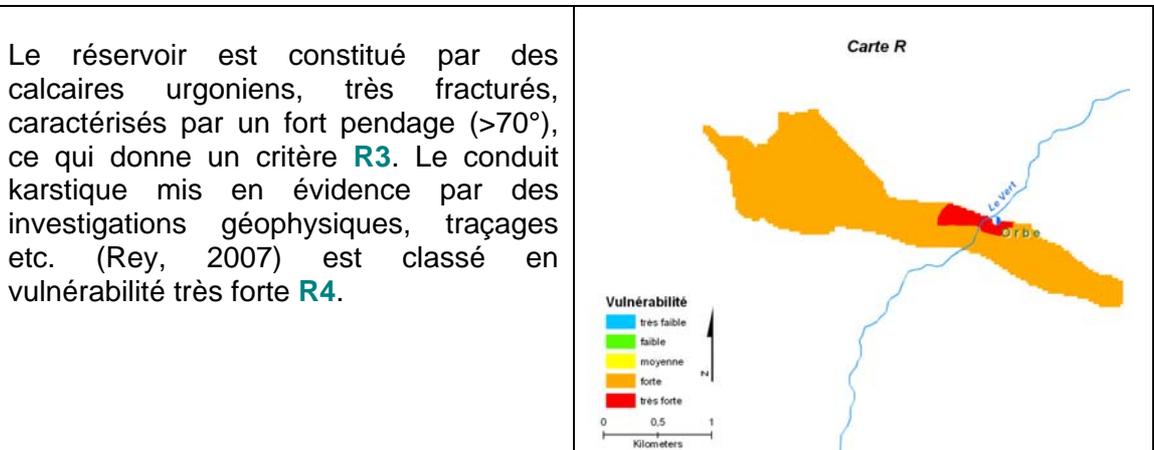


Illustration 44 : Carte du réservoir rocheux R du système karstique de la Fontaine d'Orbe

Le critère I

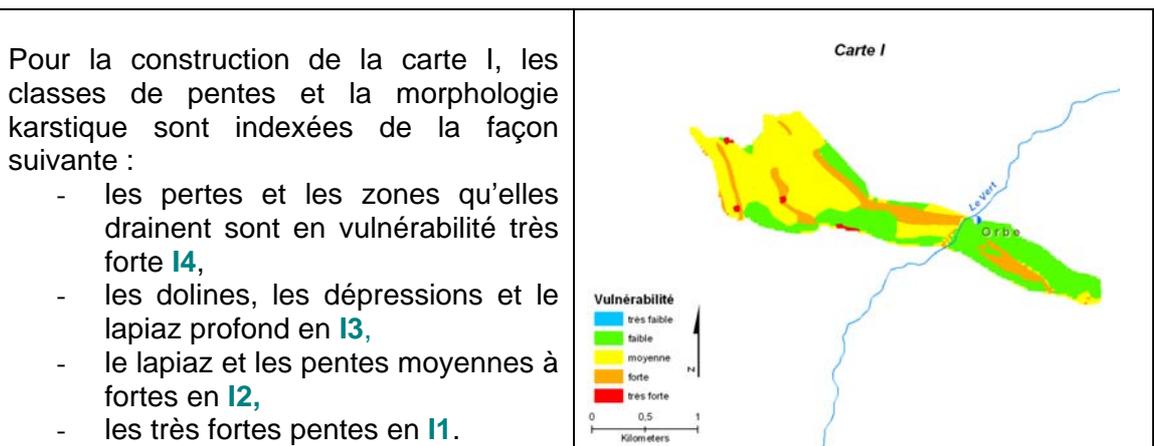


Illustration 45 : Carte du critère I conditions d'infiltration pour le système karstique de la Fontaine d'Orbe

Le critère Ka

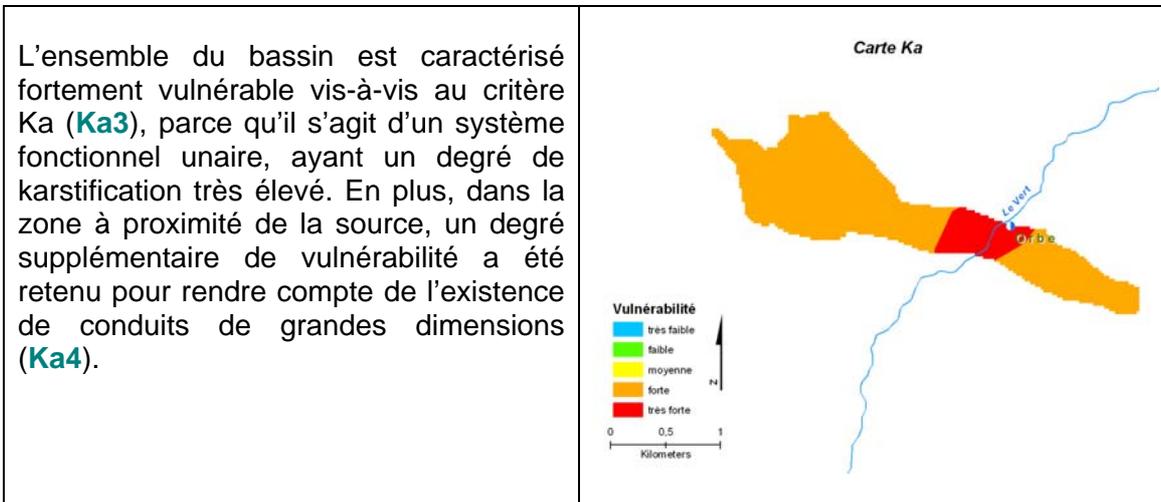
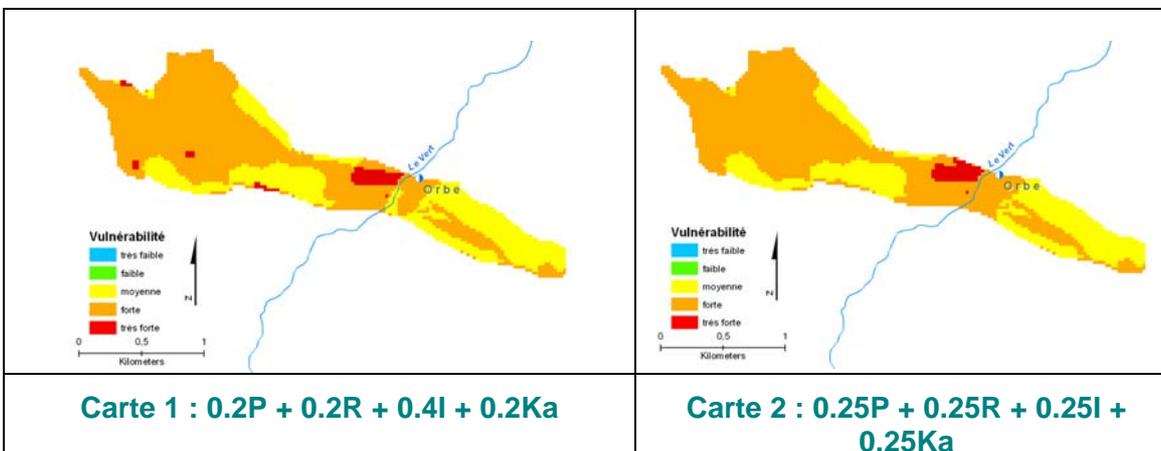


Illustration 46 : Carte du critère « degré de karstification » Ka pour le système karstique de la Fontaine de l'Orbe.

Carte de vulnérabilité de la ressource

Six tests de pondération ont été effectués en respectant la pondération totale proposée pour les paramètres relatifs à la structure et les paramètres relatifs au fonctionnement, telle qu'exposée au chapitre 3 (Illustration 47).



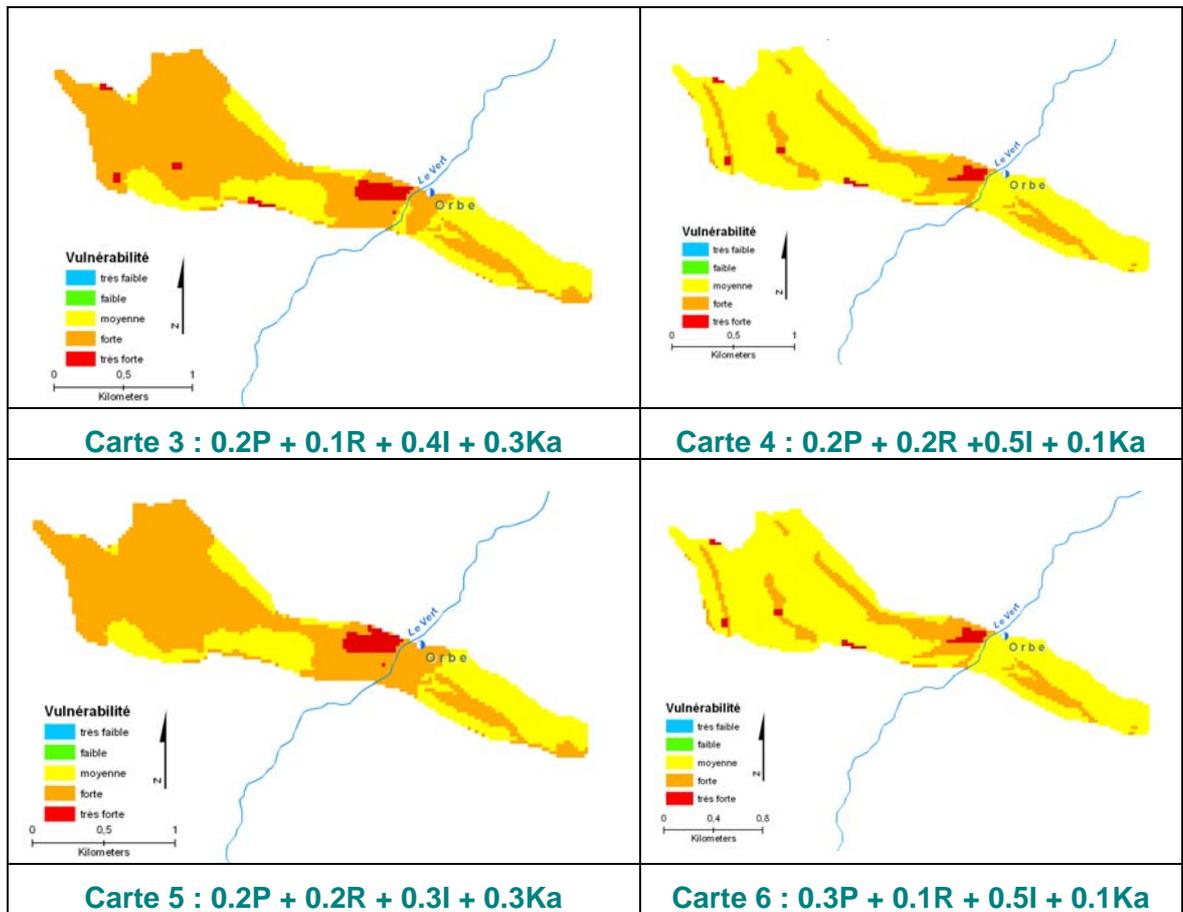


Illustration 47 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque de la ressource pour le système karstique de la Fontaine de l'Orbe.

Quatre cartes sur les six proposées (cartes 1, 2, 3 et 5) donnent des résultats similaires, avec une vulnérabilité moyenne à forte dominante, avec une zone de forte vulnérabilité à proximité de la source. Les pertes sont marquées au niveau de deux de ces quatre cartes (cartes 1 et 3) (pondération $0.4I + 0.2R + 0.2P + 0.2Ka$ et pondération $0.4I + 0.1R + 0.2P + 0.3Ka$). Les deux cartes (cartes 2 et 5) ne permettant pas de différencier les pertes peuvent donc être écartées. Les deux autres cartes pour lesquelles la pondération du critère Infiltration est supérieure à la gamme proposée (0.5 au lieu de 0.3 à 0.4) et une valeur moindre pour le critère Ka (0.1 au lieu de 0.2 à 0.3) sont similaires. Ces cartes présentent une vulnérabilité moyenne dominante (jaune) et mettent en évidence des zones de vulnérabilité forte correspondant à des zones de dolines, dépressions et des lapiaz avec des cannelures se développant en profondeur, ainsi que les zones de perte. Deux des six cartes peuvent être retenues comme carte de vulnérabilité intrinsèque de la ressource, soit la carte résultant de la pondération ($0.4I + 0.2R + 0.2P + 0.2Ka$) et la carte avec la pondération suivante : $0.5I + 0.2R + 0.2P + 0.1Ka$. L'ensemble de ces cartes montre l'intérêt d'effectuer des tests en respectant la pondération proposée pour les critères concernant la structure et les

critères relatifs au fonctionnement, afin de pouvoir retenir une carte de vulnérabilité mettant en évidence les éléments les plus discriminants tels que les pertes.

4.2.2. Vulnérabilité de la source

En prenant la Fontaine d'Orbe comme référence, quatre cartes I_{captage} ont été réalisées en traçant les isochrones à 12h, 24h, 36h et 48h basées sur les vitesses des traçages (Illustration 48). Les conduits souterrains supposés ont été identifiés par des zones très vulnérables sur ces cartes (Illustration 49).

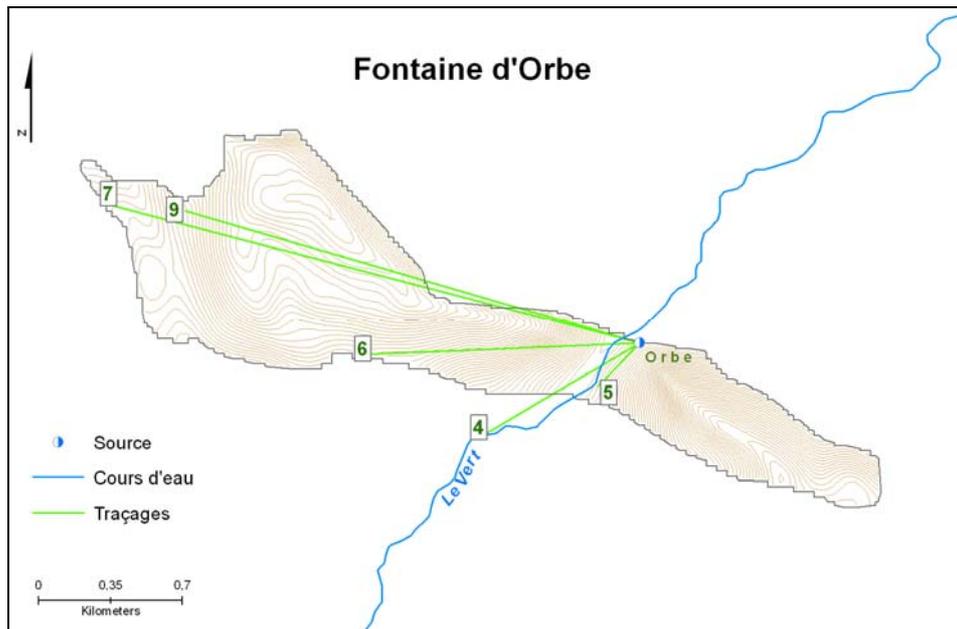
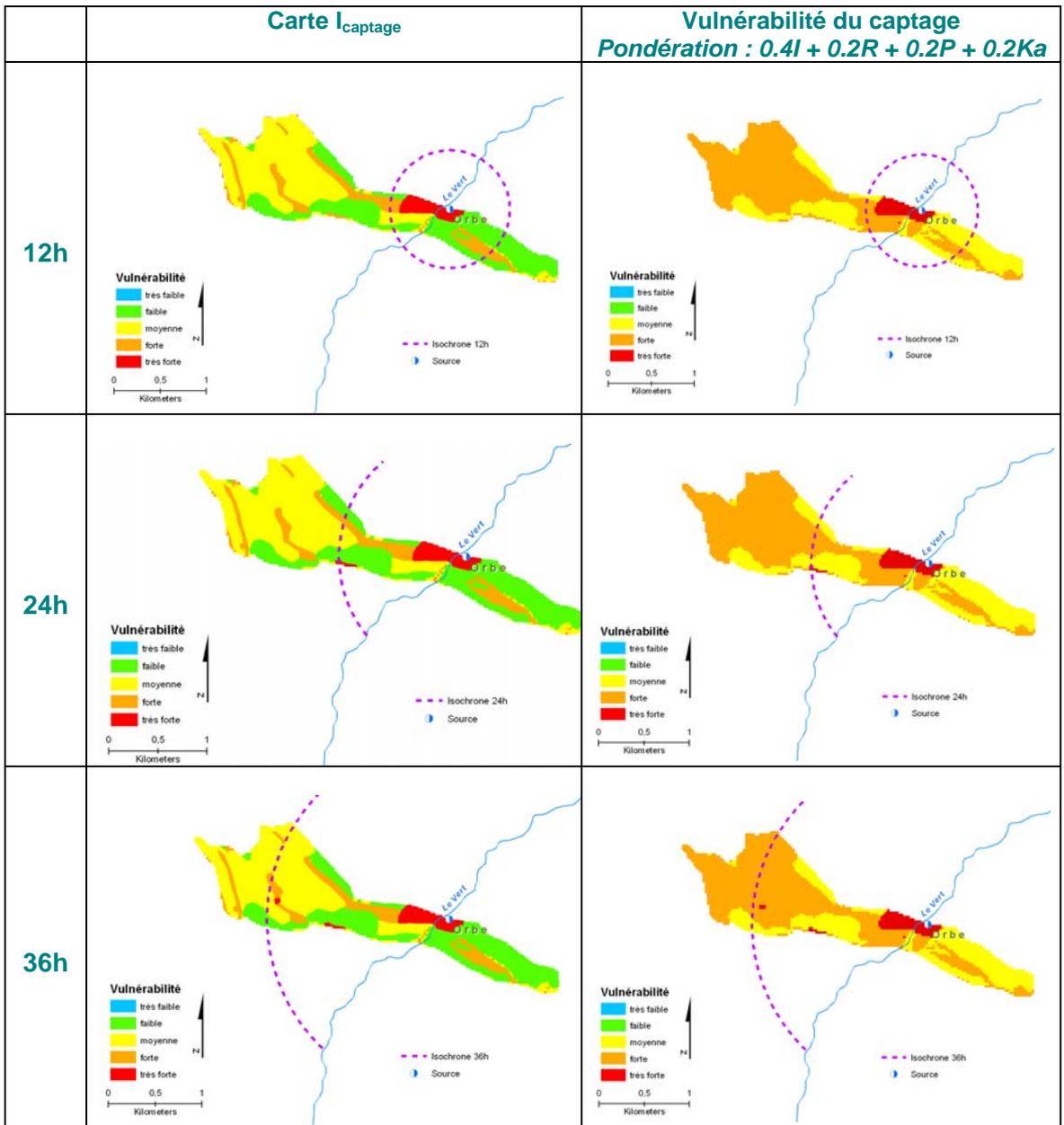


Illustration 48 : Localisation des essais de traçage du système karstique de la Fontaine d'Orbe

Pour les traçages N° 4 et 5 le traceur a été injecté directement dans le cours d'eau, en période d'étiage, afin de mettre en évidence les relations du cours d'eau Le Vert d'Arette avec le système karstique sous-jacent. Malgré des vitesses très rapides ces traçages ne sont pas utilisés pour l'élaboration des isochrones en raison de faible restitution.

D'autre part, les traçages N° 6, 7 et 9 ont été réalisés à partir des avens situés en rive gauche du Vert d'Arette (1 à 2,5 km de la source) en conditions hydrologiques de hautes eaux. Les vitesses calculées varient de 49 à 52 m/j. La restitution du traceur est ici beaucoup plus importante (supérieur à 40% pour le traçage N°9). Pour cette raison, le tracé des isochrones est basé sur l'information fournie par ces trois traçages. Aucun traçage n'est disponible pour la rive droite.



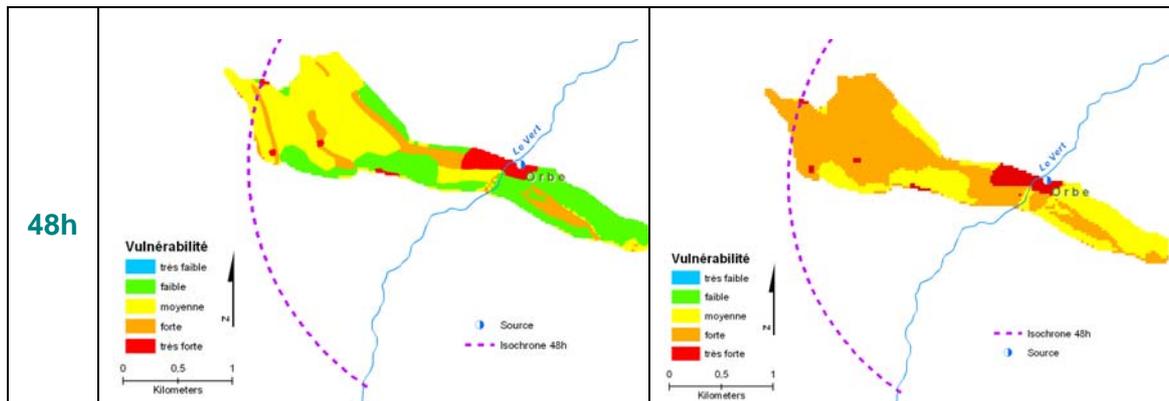


Illustration 49 : Cartes de vulnérabilité intrinsèque du captage pour la Fontaine d'Orbe

Les quatre cartes de vulnérabilité intrinsèque du captage de la Fontaine d'Orbe permettent de distinguer trois classes de vulnérabilité principalement, tout en mettant en évidence une zone de très forte vulnérabilité à proximité de la source là où le réseau de conduits karstique est bien développé avec des conduits de taille importante. Lorsque le délai d'intervention est supérieur à 12h, les pertes sont intégrées à la carte de vulnérabilité du captage. La carte de vulnérabilité du captage basée sur l'isochrone de 48h met en évidence des zones de vulnérabilité très forte au niveau des pertes, zones à protéger en priorité. Ces zones tout comme celle à proximité du captage peuvent constituer des secteurs pour lesquels des périmètres de protection immédiat pourront être retenus. Les zones de vulnérabilité forte pourront être assimilées aux périmètres de protection rapprochée, le reste du bassin d'alimentation pouvant être assimilé au périmètre de protection éloignée.

4.3. AQUIFERE KARSTIQUE DE LA CRAIE

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. La description du site est donnée dans Pinto-Ferreira et al. (2008) et à l'annexe 3.

4.3.1. Vulnérabilité de la source

Critère P

Dans les zones amont des bétouilles, la couverture argileuse favorise le ruissellement. L'indice P4 (état de surface) est donc donné sur l'ensemble des bassins d'alimentation des bétouilles.

Pour le sol, l'épaisse couverture d'argiles à silex (>5 m) sur les plateaux est classée en S1. Elle est moins épaisse (20cm 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).

Enfin, l'information fournie de l'analyse de la lithologie, fracturation et de l'épaisseur de la ZNS n'apporte pas d'élément impactant la carte P en raison des fortes épaisseurs des formations superficielles (S1) qui exercent la meilleure fonction de protection (Illustration 50).

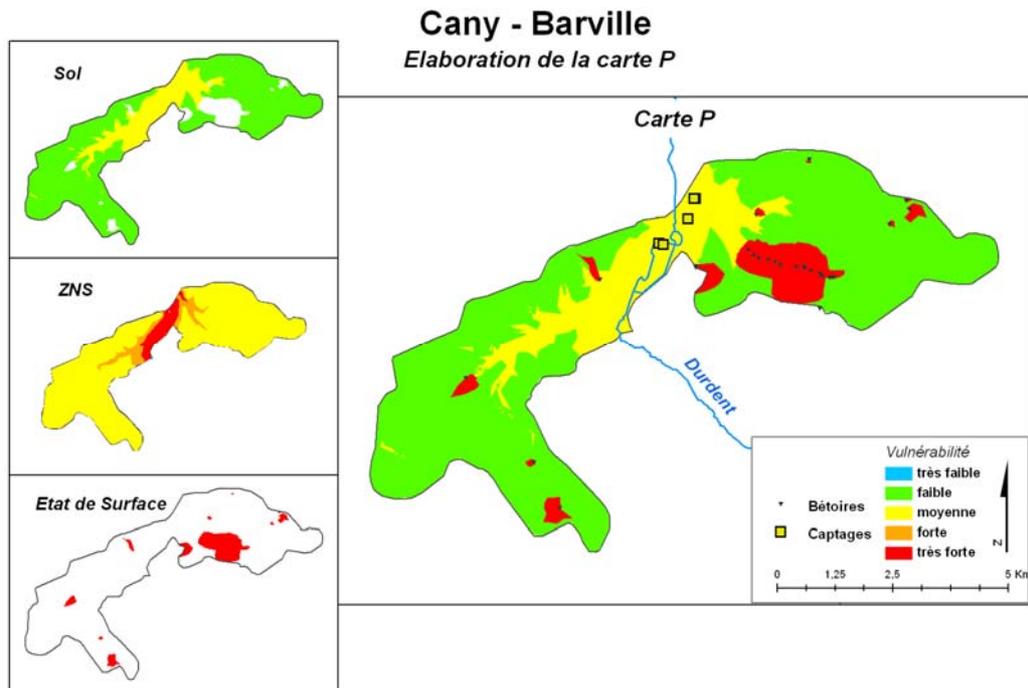


Illustration 50 : Carte du critère P du système de Cany Barville

Critère R

Le réservoir est dans la craie caractérisée au niveau régional en **R2**.

Les conduits karstiques, les vallées et les zones faillées ayant une fracturation plus importante représentent un potentiel de karstification plus élevé et sont classés en **R4** (Illustration 51).

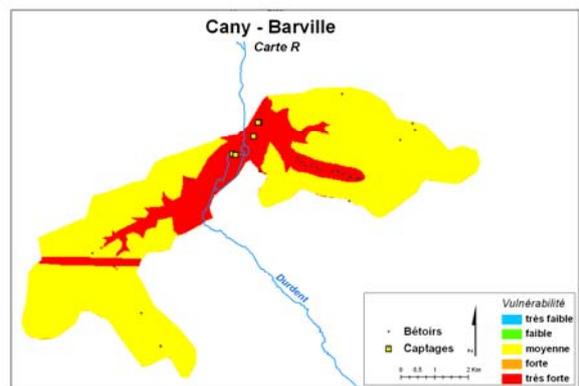
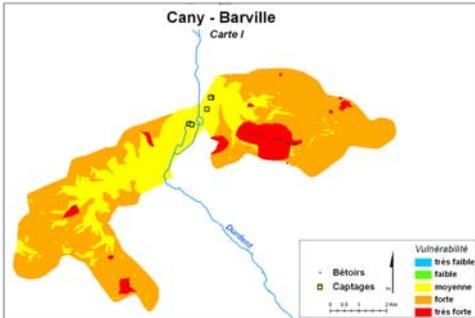


Illustration 51 : Carte du critère R roche du réservoir pour le site de Cany Barville

Critère I



Les zones d'alimentation des bétoirs sont caractérisées très vulnérable **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 52).

Illustration 52 : Carte du critère I pour le site de Cany Barville.

Critère Ka

La rive gauche de la Durden est un système unaire caractérisé par un fonctionnement karstique modéré **Ka2**.

La rive droite de la Durden est un système karstique unaire mais très fonctionnel **Ka3**, comme attesté par les traçages réalisés

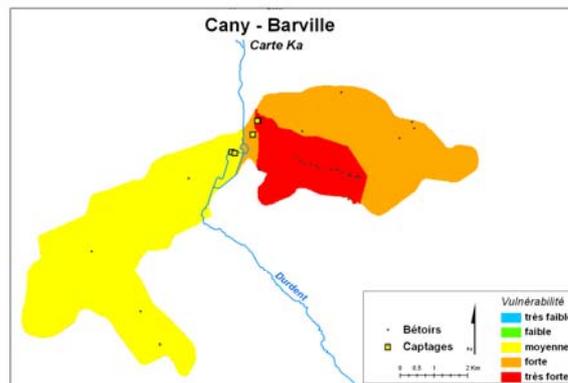


Illustration 53 : Carte du critère Ka de Cany Barville

Une zone caractérisée par de nombreuses bétoires alignées est suspectée d'être connectée avec deux des forages (00574X0148 et 00574X0130) via un conduit karstique, la zone est notée **Ka4** (Illustration 53).

Des tests de pondération de ces quatre critères ont été effectués :

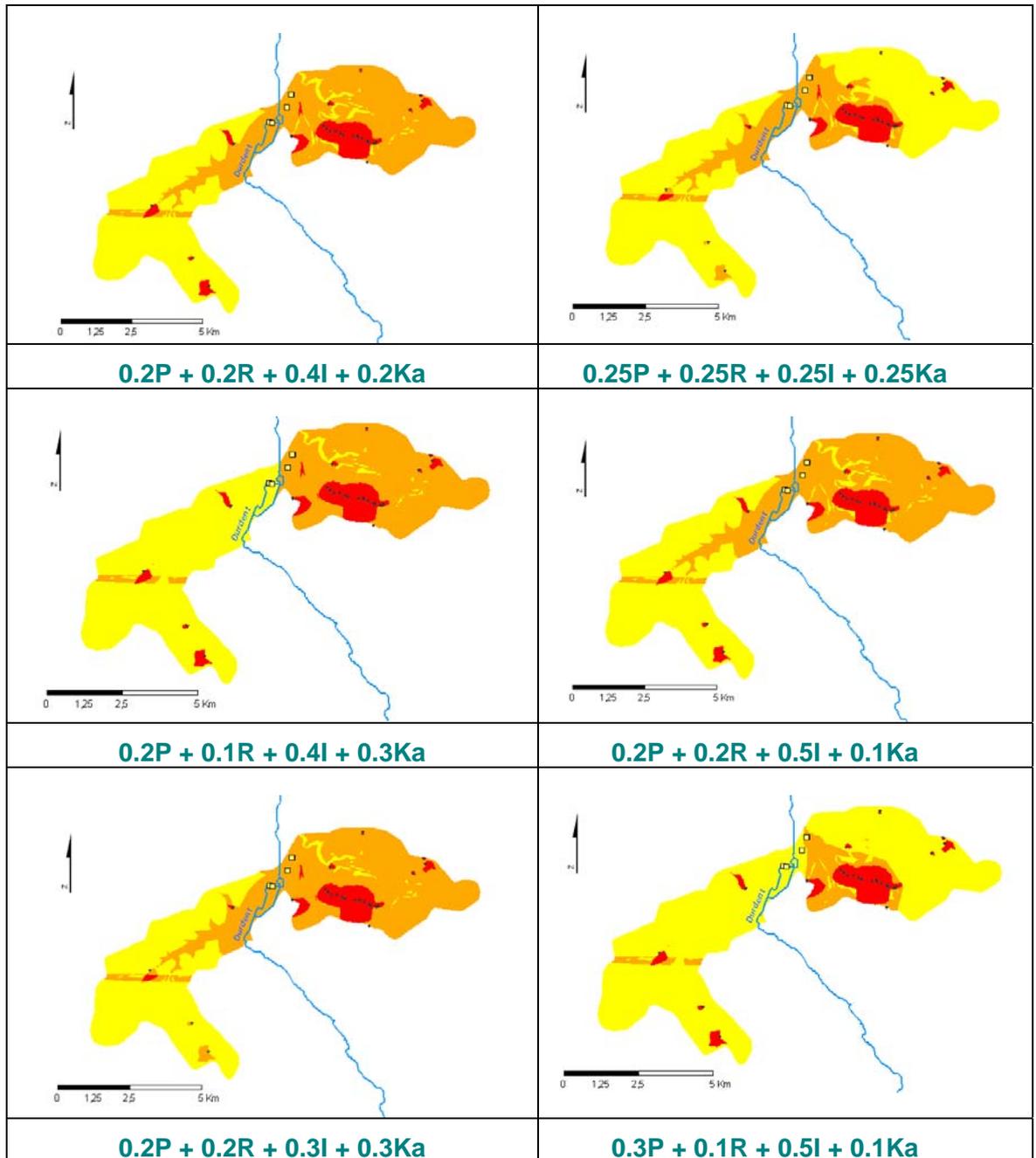


Illustration 54 : Cartes de vulnérabilité du site de Cany Barville

Comme dans les cas précédents, la gamme de pondération proposée permet de mettre en évidence sans ambiguïté les zones les plus vulnérables du bassin. Le reste du bassin peut être affecté d'une vulnérabilité forte ou moyenne en fonction des pondérations choisies. Les zones correspondant à des zones d'infiltration au niveau des bétouilles et leur bassin versant associé ressortent en tant que zones de vulnérabilité très forte pour quatre des six cartes. Pour les deux autres cartes, ces zones sont néanmoins considérées comme des zones de vulnérabilité forte à très forte (orange, respectivement rouge). La carte avec la pondération suivante $0.4I + 0.2R + 0.2P + 0.2Ka$ peut être retenue, elle respecte la gamme de pondération proposée et de plus elle permet de traduire la nature plus karstique de la partie du bassin 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.

4.3.2. Vulnérabilité des forages captés

Le tracé des isochrones des cartes I_{captage} est basé sur les informations issues des traçages artificiels (Illustration 55).

Injection	Restitution	Distance	Vmax	Isochrone
Bosville	00574X0148	3368 m	140 m/h	12h : 1680 m 24h : 3360 m 36h : 5040 m 48h : 6720 m
Bosville	00574X0138	3313 m	40 m/h	12h : 480 m 24h : 960 m 36h : 1440 m 48h : 1920 m
Barville	00574X0148	1465 m	40 m/h	12h : 480 m 24h : 960 m 36h : 1440 m 48h : 1920 m
Barville	00574X0138	1019 m	25 m/h	12h : 300 m 24h : 600 m 36h : 900 m 48h : 1200 m

Illustration 55 : Tableau des essais de traçage du site de Cany-Barville

Pour le site de Cany-Barville, il n'existe pas de données concernant les vitesses des écoulements souterrains pour la rive gauche de la Durdent. En raison de ce manque d'information, des délais d'intervention ne sont pas proposés et la carte I n'a pas été modifiée dans cette partie.

Les isochrones sont centrées au captage référencé 00574X0148 dans la Banque de données du sous-sol (BSS), car les traceurs qui y ont été restitués mettent en évidence des vitesses de transit très rapides, beaucoup plus élevées que vers les autres captages (Illustration 56).

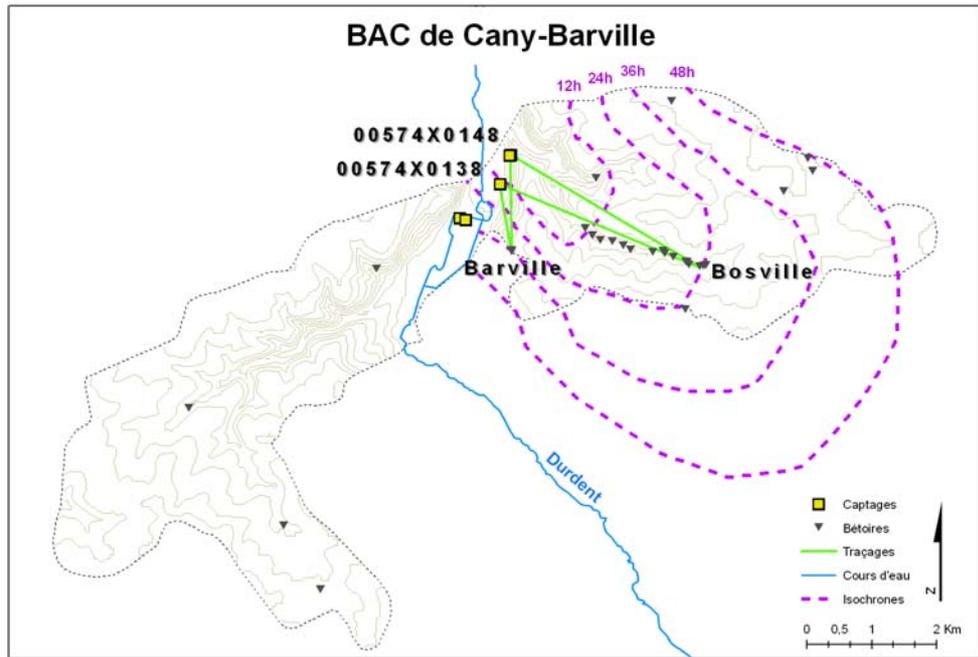
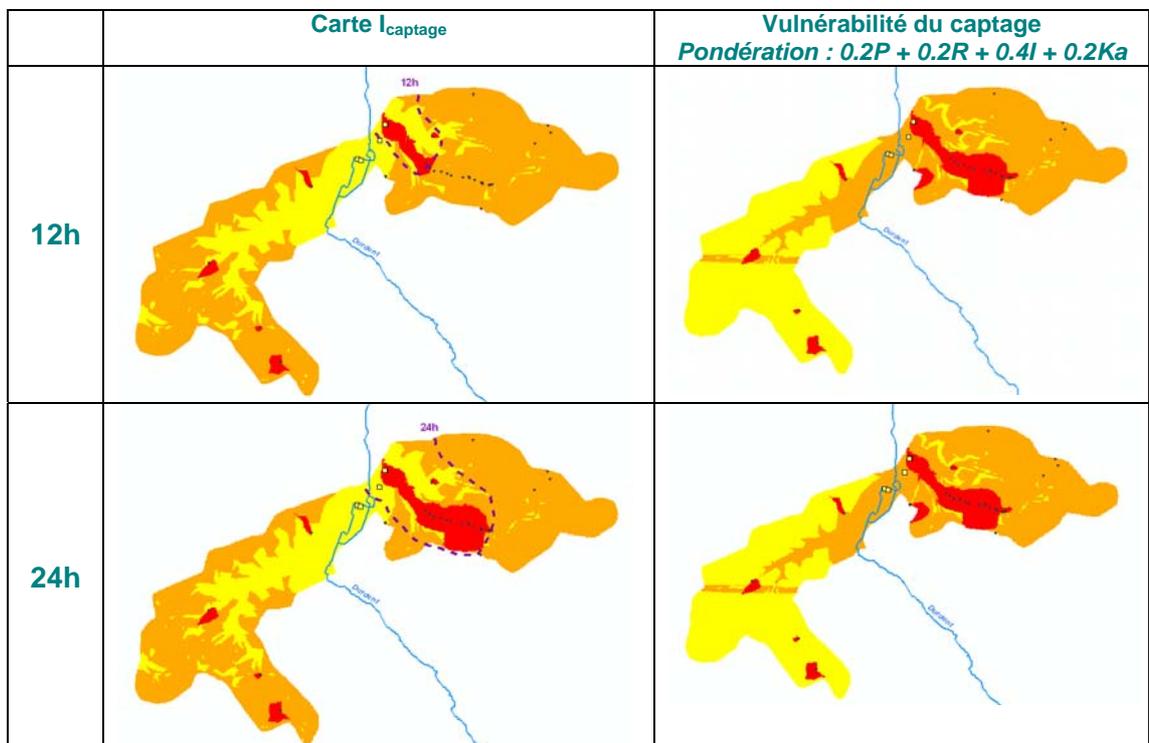


Illustration 56: Carte I_{capture} des forages de Cany-Barville



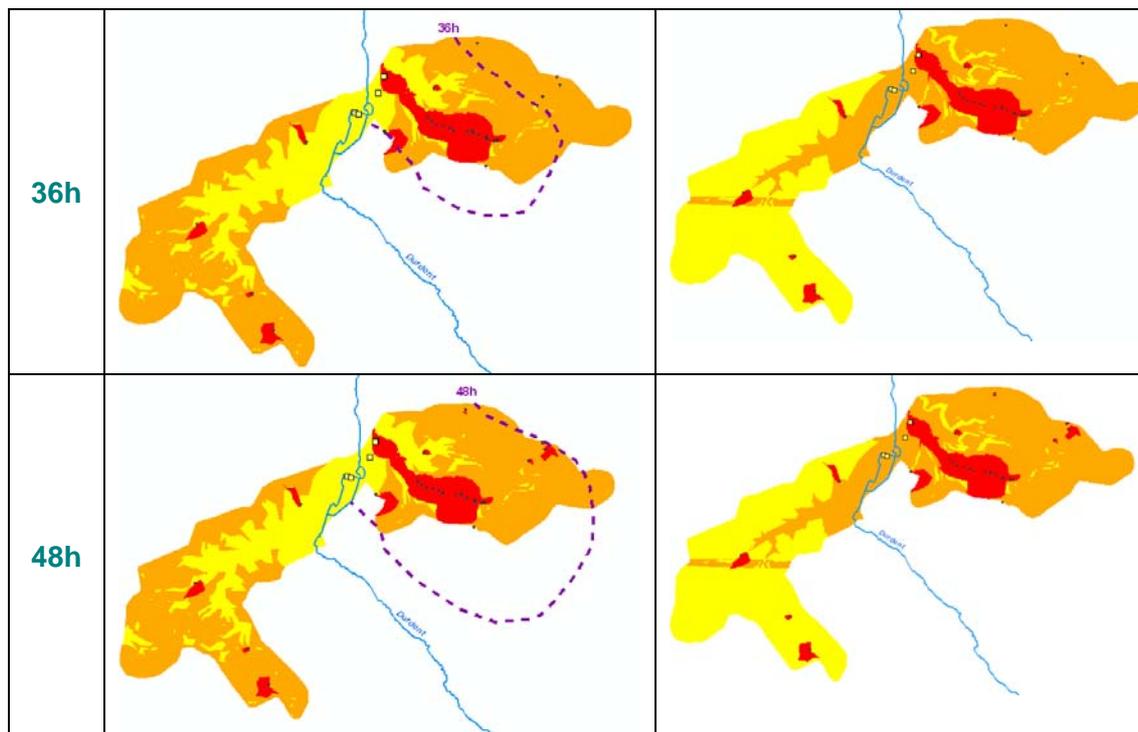


Illustration 57 : Cartes de vulnérabilité de la source ou du captage pour le site de Cany-Barville

Les cartes de vulnérabilité intrinsèque de la source pour les différentes isochrones sont similaires, à l'exception de celle concernant l'isochrone 48h qui intègre comme zone de vulnérabilité très forte le bassin versant de bétoires situé en bordure orientale du bassin d'alimentation. La réalisation d'essais de traçage dans la partie occidentale permettrait de proposer une carte de vulnérabilité de la source augmentant partie ou totalité la vulnérabilité des vallées sèches.

La zone de très forte vulnérabilité de la partie située en rive droite de la Durdent pourra être considérée comme un périmètre de protection rapprochée, avec un périmètre de protection immédiat autour du captage. Ce périmètre est continu de la source vers l'amont hydraulique. Des périmètres de protection rapprochée pourront être dissociés et constitués de périmètres satellites correspondant à une protection rapprochée, pour les autres zones de très forte vulnérabilité.

5. Considérations pratiques



5.1. SOURCES DE DONNEES

Nature de la donnée	Echelle	Origine	Remarques
MNT (grille SIG)	pas de 50 m ou de 25 m	BD ALTI (IGN) www.ign.fr	Permet de générer une grille de pente Données payantes
Carte pédologique	1/250.000 1/100.000	INRA http://gissol.orleans.inra.fr/actualite/publications.php	Descriptif des unités de sol ; Couverture incomplète Données payantes
Carte pédologique	1/50.000 1/25.000 1/10.000	INRA www.inra.fr	Couverture très faible Données payantes
Référentiel Régional Pédologique (base de données cartographique)	1/250.000	INRA : Programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols du GIS Sol http://gissol.orleans.inra.fr/gissol/gissol.php Information dans un guide sur la caractérisation des sols pour la protection des ressources en eau http://acklins.orleans.inra.fr/actualite/Documents/Guide-BV.pdf *	Chaque UTS est caractérisée par des données descriptives (texture, hydromorphie, nature du matériau d'origine, profondeur d'apparition du substrat...). Couverture incomplète Données payantes
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... Données payantes
Carte géologique vectorisée	1/50.000	BRGM www.brgm.fr	L'harmonisation des cartes géologiques vectorisées est en cours à l'échelle nationale Données payantes
Cartes géologiques de la France métropolitaine au 1/50.000 avec notices	1/50.000	BRGM www.brgm.fr	Pour préciser la géométrie et la lithologie de l'aquifère et de sa couverture éventuelle. Format papier Données payantes
Occupation du sol	Communale	RGA (recensement général agricole) www.agreste.agriculture.gouv.fr/	Fournit les statistiques agricoles par commune + cartes de types de culture. Données publiques
Occupation du sol : Corine Land Cover	1/100.000	IFEN www.ifen.fr	Année 2000 Données publiques

Nature de la donnée	Echelle	Origine	Remarques
Occupation du sol : Photos aériennes	Résolution 50 cm	BD-ORTHO (IGN) www.ign.fr	Photos aériennes ortho-rectifiées Données payantes
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 Données publiques
BD Carthage (base de données sur la CARTographie Thématique des Agences de l'eau et du ministère de l'Environnement)	1/50 000 à 1/100 000	http://sandre.eaufrance.fr	unités administratives, réseau routier, réseau ferré, occupation du sol, toponymie, équipements et cours d'eau Données publiques
Banque HYDRO	données ponctuelles	MEDAD www.hydro.eaufrance.fr/	Chroniques de débits de rivière et débits de sources Données publiques
BSS	données ponctuelles	BRGM http://www.brgm.fr/numerique.jsp	Données géologiques et hydrogéologiques (niveau d'eau, transmissivité, débit). Données publiques L'ensemble des données disponibles sur une zone peut être obtenue automatiquement via les Géor@pports Données payantes
BD Cavité	données ponctuelles	BRGM http://www.bdcavite.net/	Localisation des cavités d'origine anthropique ou naturelle en France Données publiques
BASIAS	données ponctuelles	BRGM http://basias.brgm.fr/	Inventaire des anciens sites industriels et activités de service Données publiques
BASOL	données ponctuelles	MEDAD http://basol.ecologie.gouv.fr/	Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif. Données publiques
BD des schémas d'assainissement	données ponctuelles	Pas de bancarisation systématique	Données publiques

*Les sites des partenaires régionaux du programme IGCS : Bourgogne : <http://igcsstb.org/> ; LanguedocRoussillon: <http://www.umrlisah.fr/BdSolLR/Asp/Default.asp> ; MidiPyrénées: <http://www.midipyrenees.chambagri.fr/Cartedessols.html> ; Pays de la Loire : <http://www.igcspaysdelaloire.inh.fr/> ; PoitouCharentes: <http://www.sirpoitoucharentes.org/> ; RhôneAlpes: <http://www.rhonealpes.chambagri.fr/sira/> ; Guyane, Martinique, NouvelleCalédonie, Wallis et Futuna : <http://www.mpl.ird.fr/valpedo/>.

5.2. OUTILS DE CARTOGRAPHIE

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

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

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

Pour des bassins de petite taille, une spatialisation du terrain peut être effectuée sur un logiciel permettant d'effectuer des calculs sur des grilles, comme par exemple xls, sans avoir recours à un logiciel de système d'information avec un module dédié à la transformation des vecteurs en grille de type raster et à la gestion des grilles.

5.3. CONSEILS POUR LA PLANIFICATION DU TRAVAIL

La cartographie de tous les paramètres ne doit pas être entreprise de manière systématique. Il est nécessaire de prendre connaissance des données disponibles, de faire une première reconnaissance de terrain, afin de déterminer l'ordre dans lequel les paramètres doivent être cartographiés. L'analyse des données disponibles est un pré requis en début d'étude, quelque soit la taille du bassin d'alimentation.

La cartographie des données est réalisée à partir d'une part de données issues de cartes existantes (ex. carte pédologique, carte géologique) pour lesquelles des traitements sont effectués (regroupement de couches en fonction de leur lithologie et non de leur âge pour la géologie pour établir la carte de P, R ; sélection des informations pertinentes pour le sol à partir de cartes et bases de données pédologiques (épaisseur moyenne ou épaisseur minimale voire pondérée pour les données issues des unités de sol par ex.) ; et d'autre part à partir d'acquisition de données sur le terrain. Pour les observations de terrain, il est conseillé d'établir une base de données géo-référencées (à l'aide d'un GPS) associés à des photos d'affleurement par exemple. Les données ponctuelles d'observation (sol, épikarst, fracturation, ...) feront l'objet d'un regroupement dans une entité cartographique ; ainsi il est recommandé de faire figurer sur les cartes du critère concerné, les points d'observation, afin de documenter ces cartes et de donner une identification de la densité de points par rapport à la dimension de l'entité définie. Les données ponctuelles d'épaisseur et de nature des sols peuvent être obtenues à l'aide d'une tarière pour des terrains de dimension de quelques dizaines de kilomètres, si aucune

donnée n'est disponible. La tarière peut également être utilisée pour faire des vérifications de données issues d'une cartographie existante.

5.4. ELEMENTS DE COÛT

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

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

Des éléments de coûts sont donnés dans le tableau suivant. **Le calcul du temps de travail nécessaire pour l'application de la démarche méthodologique est indicatif.** L'estimation ne comprend pas les études hydrogéologiques de délimitation du bassin d'alimentation du captage, celles-ci étant considérées comme étant disponibles au moment de l'établissement de la cartographie de la vulnérabilité de l'AAC dans le cadre de la démarche AAC ou de délimitation de périmètres de protection. Il faut également intégrer le coût d'achat de données (BRGM, IGN, INRA...).

	Taille du bassin d'alimentation		
	Env. 10Km ²		> 100 km ²
Compilation documentation existante (géologie et hydrogéologie)	2	jours	5
Reconnaissance des captages et du bassin versant souterrain	1	jours	4
Interprétation des données	2	jours	4
Acquisition de données de terrain pour les paramètres P, R, I	2 à 5		4 à 10

	Taille du bassin d'alimentation		
	Env. 10Km ²		> 100 km ²
Evaluation des paramètres de vulnérabilité	5	jours	8
Interprétation, réalisation des cartes de vulnérabilité	2	jours	4
Contrôles de terrain (nature des sols et du sous-sol), ajustement	2	jours	3
Rédaction du rapport final	2	jours	2
Gestion de projet, comités de pilotage	2	jours	2
Total jours	20 à 25	jours	36 à 42

6. Conclusions et perspectives



La méthode **PaPRIKa** est un outil de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères et des systèmes karstiques dans un but soit de caractériser la vulnérabilité de la source ou du captage en vue de délimiter des périmètres de protection, soit de caractériser les bassins d'alimentation des captages dans une démarche de protection prioritaire des captages vis-à-vis des pollutions diffuses. Cette méthode résulte de la prise en compte d'évolutions de la méthode EPIK, première méthode dédiée aux aquifères karstiques comme point de départ ainsi que les nombreux développements qui ont eu lieu au niveau européen au cours de la dernière décennie.

Ce guide est destiné aux hydrogéologues praticiens, aux hydrogéologues agréés ainsi qu'aux administrations et agences de l'eau pouvant commander des études soit de protection des bassins d'alimentation des captages, soit de délimitation des périmètres de protection dans le cadre du respect de la loi sur l'eau en vigueur.

L'attribution des différents indices pour chacun des critères nécessite une bonne maîtrise des concepts de l'hydrogéologie karstique ainsi qu'une approche naturaliste sur le terrain. Ce guide donne les concepts de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des systèmes karstiques afin de poser des bases communes pour la délimitation des périmètres de protection dans ce type d'environnement hydrogéologique spécifique. Le système de pondération proposé est cadré, donnant des gammes de valeur pour les différents critères, mais nécessite la réalisation de tests pour déterminer le système le plus approprié au vu des caractéristiques du système. La réalisation des cartes tout comme les cartes de vulnérabilité résultante doivent être documentées et explicitées dans un rapport afin de donner de manière explicite les choix effectués pour attribuer une valeur ou une autre d'indice des critères.

La cartographie de la vulnérabilité de la source ou du captage pose des bases solides pour traduire les zones de vulnérabilité en périmètres de protection. La traduction n'est pas automatique, mais elle nécessite d'une part de passer à l'échelle du parcellaire et d'autre part d'effectuer des regroupements de zones de vulnérabilité similaires ou proches.

Les cartes de vulnérabilité obtenues à l'aide de la méthode **PaPRIKa**, pour la ressource et pour la source ou captage, ne sont en aucun cas des cartes permettant l'implantation d'un site industriel ou agricole sans passer par l'établissement d'une étude détaillée d'impact sur l'environnement.

Cette méthode pourra faire l'objet de révision, après 5 à 10 ans de mise en œuvre.

7. 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).

Conduits : drains résultants de l'élargissement de fissures ou d'interstrates en milieu carbonaté par l'action agressive de l'eau d'infiltration ; ils sont connectés hydrauliquement au milieu environnant et forme un réseau de conduits plus ou moins développés et hiérarchisés. Ces conduits en charge ou à écoulement libre permettent d'évacuer les eaux vers l'exutoire de manière rapide.

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.

Failles : fentes et fissures dans les roches dures.

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.

Lapiez : surface calcaire mis à nu soumis à l'érosion (vent, gel-dégel, précipitations) caractérisée par la présence de rainures encadrées par des arrêtes aiguës.

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

Phénomènes karstiques : phénomènes endo- et exo-karstiques s'appliquant aux reliefs calcaires érodés par l'action dissolvantes des eaux de ruissellement (ex. gouffre, dolines, vallées sèches, grotte, réseau karstique).

Polluant/Contaminant : Agent physique, chimique ou biologique dans un hydrosystème, qui y provoque, par sa concentration dans l'eau, des perturbations préjudiciables au bon équilibre de l'écosystème et en réduit les possibilités d'usages de l'eau.

Recharge diffuse : réalimentation d'un aquifère à l'échelle de la totalité du bassin d'alimentation, par opposition à une recharge ponctuelle, au niveau d'une perte d'un cours d'eau.

Réserves d'eau souterraine : les réserves définies en termes de volumes, correspondent au volume d'eau total contenu dans un aquifère à un instant donné.

Ressources souterraines : elles représentent pour une période déterminée l'alimentation totale de l'aquifère, soit sa recharge. Elles s'expriment en débit ou en volume pour une période donnée qui peut être l'année ou le mois ; elles sont constituées par l'infiltration des pluies, par l'alimentation d'un aquifère adjacent ou par les pertes d'un cours d'eau.

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

Système karstique : le bassin d'alimentation des sources karstiques est dénommé à l'aide de ce terme. Elles sont alimentées d'une part par l'eau infiltrée de manière diffuse dans l'aquifère et d'autre part par des eaux de surface issues du ruissellement sur un impluvium non karstique, au niveau de pertes.

Tarissement : phase d'écoulement d'un cours d'eau ou d'une source correspondant à la décroissance régulière du débit en l'absence de tout apport météorique et d'intervention anthropique, conduisant en

ultime phase à l'interruption de l'écoulement.

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, fluorescéine, rhodamine, leucophore, pyranine etc.), à des spores lycopodium, ou encore à des composés chimiques tels que le chlorure de sodium.

Vallée sèche : vallée privée d'écoulement d'eau pérenne, les eaux de ruissellement s'infiltrant dans le sous-sol carbonaté. La vallée s'est asséchée en raison de la formation ou de la réouverture de pertes ou de puits.

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 d'infiltration ou 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.

8. Bibliographie sommaire

Angeli - Bureau d'études géologiques, 1996. Etudes préliminaires à l'établissement des périmètres de protection des sources du Toulon. Rapport de synthèse.

Balayre S., Subias C. 2008. Analyse méthodologique de RISKE 2 : Application au système karstique de Font Vincent (Lot, 46). Rapport de Master 2 Professionnel « Surveillance et gestion de l'environnement » de l'Université Paul Sabatier, Toulouse

BRGM 2007. Carte géologique 1/25000^e, Cartographie détaillée des terrains du Kimméridgien au sud de la source de Lenclo, commune de Mauroux (Lot). Document BRGM.

Drogue C., 1992. Hydrodynamics of karstic aquifers: experimental sites in the Mediterranean karst, Southern France. In: Hydrogeology of selected karst regions (W. Back ed. in chief). Hannover, Heise, 133-149.

Drogue, C., 1974. Structure de certains aquifères karstiques d'après les résultats de travaux en forage (Structure of certain karst aquifers from drilling data). Comptes-Rendus – Académie des Sciences Paris 278, 2621–2624

El Azawi M., 2009. Contribution à la validation de PaPRIKa (méthode de cartographie de la vulnérabilité des karsts) : approche multidisciplinaire sur les karsts du Larzac (Aveyron). Master 2^{ème} année Hydrologie-Hydrogéologie de l'Université Pierre et Marie Curie.

El Azawi M., Plagnes V., L. Danneville, 2009. Validation de la méthode PaPRIKa sur les karsts du Larzac. Rapport de Master 2 Hydrologie-Hydrogéologie de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris 6.

El Hakim M et Bakalowicz M., 2007. Significance and origin of very large regulating power of some karst aquifers in the Middle East. Implication on karst aquifer classification. J Hydrol 333 : 2-4 : 329-339

Jaunat J., Huneau F., Rey F., Pretou F., Riss J., 2008. Application de la méthode RISKE2 aux sources d'Ourtau et de la fontaine d'Orbe (64). Rapport n° 2008-027, Ghymac, Université Bordeaux 1

Kavouri K., Plagnes V., Trémoulet J., Dörfliger N (2009): Karst resource and source intrinsic groundwater vulnerability mapping, as basis to delineate protection areas of capture works - Application of the PaPRIKA method on the Ouyse karst system (SW France), submitted to Hydrogeology Journal.

Kavouri K., Plagnes V., Trémoulet J., Rejiba F. 2008. Evaluation cartographique de la vulnérabilité des eaux souterraines de la partie nord du Causse de Gramat (Lot) - Application de la méthode PaPRIKa. Rapport de Master 2 « Géo-risques et informations environnementales » de l'Université de Marne la Vallée

Laignel B., 2003. Caractérisation et dynamique érosive de systèmes géomorphologiques continentaux sur substrat crayeux. Exemple de l'Ouest du Bassin de Paris dans le contexte nord-ouest européen. HDR, Université de Rouen, 138 p.

Leclerc V., Fournier M., Leroy B., 2008. Test de la méthode RISKE 2 en milieu karstique appliqué au bassin d'alimentation des sources de Fontaine sous Préaux. Rapport de Master 1 de l'Université de Rouen.

Mangin A., 1975 : Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques *Thèse Université Dijon, p124*

Marsaud B.,1997 : Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux, Thèse de l'université Paris XI ; document du BRGM 268, 301 pp.

Muet P., 1985. Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du nord du Causse de Martel (Corrèze). Thèse de 3^e cycle. Université d'Orléans

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 des préconisations en faveur de l'amélioration des démarches de protection. Rapport Agence de l'eau RMC et AG, GINGER Environnement, 28p., disponible sur <http://www.eaurmc.fr/documentation>

Ogoula-Arondo C. & Emeriau A., 2008. Test de la méthodologie cartographique RISKE 2 de la vulnérabilité sur les sources du Toulon avec cartographie des aléas. Rapport de stage de l'ENSG Nancy.

Paris C. & Muet P., 2008. Cartographie de la vulnérabilité de deux systèmes karstiques avec la méthode PaPRIKa - Systèmes du Sorpt et du Blagour de Chasteaux et Système de La Castinière et Font Coumézide. Rapport de Master 2 « Ressource en eau » de l'Institut EGID, Université de Bordeaux 3

Pinto-Ferreira C., Fournier M., Guillet G., 2008. Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des bassins d'alimentation des forages de Cany-Barville. Rapport de Master 1 de l'Université de Rouen.

Rey F. (2007) – Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques, France), Géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés, Thèse de l'Université de Bordeaux 1, 466p.

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

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

Vouvé J., 1997. Protection du captage AEP de la ressource de l'Abîme, commune de Périgueux. Rapport d'hydrogéologue agréé à la commune de Périgueux.

Zwahlen F (ed) (2004) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report of COST Action 620. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels.

Annexe 1

Éléments de géomorphologie karstique

Le modelé karstique est caractérisé par des phénomènes endo et exokarstiques. Parmi les phénomènes exokarstiques, on trouve des dépressions de géométrie, de dimension et d'origine différentes, ainsi que des gouffres, des pertes et des lapiez. Un rappel concernant la définition des principales dépressions karstiques est effectué ici, d'une part à partir d'un extrait du livret guide de l'excursion en Quercy en septembre 2008 de l'AFK (texte de J-G Astruc et de R. Simon-Coinçon) et d'autre part du précis de Karst geomorphology and hydrology de Ford and Williams.

Les dépressions karstiques correspondent à des zones de dissolution préférentielles liées à une activité karstique actuelle. Si le drainage et sous-tirage des matériaux meubles par le karst est interrompu ou plus faible que les apports, les dépressions se transformeront en mares, comblées par des sédiments argileux ; elles seront ainsi fossilisées.

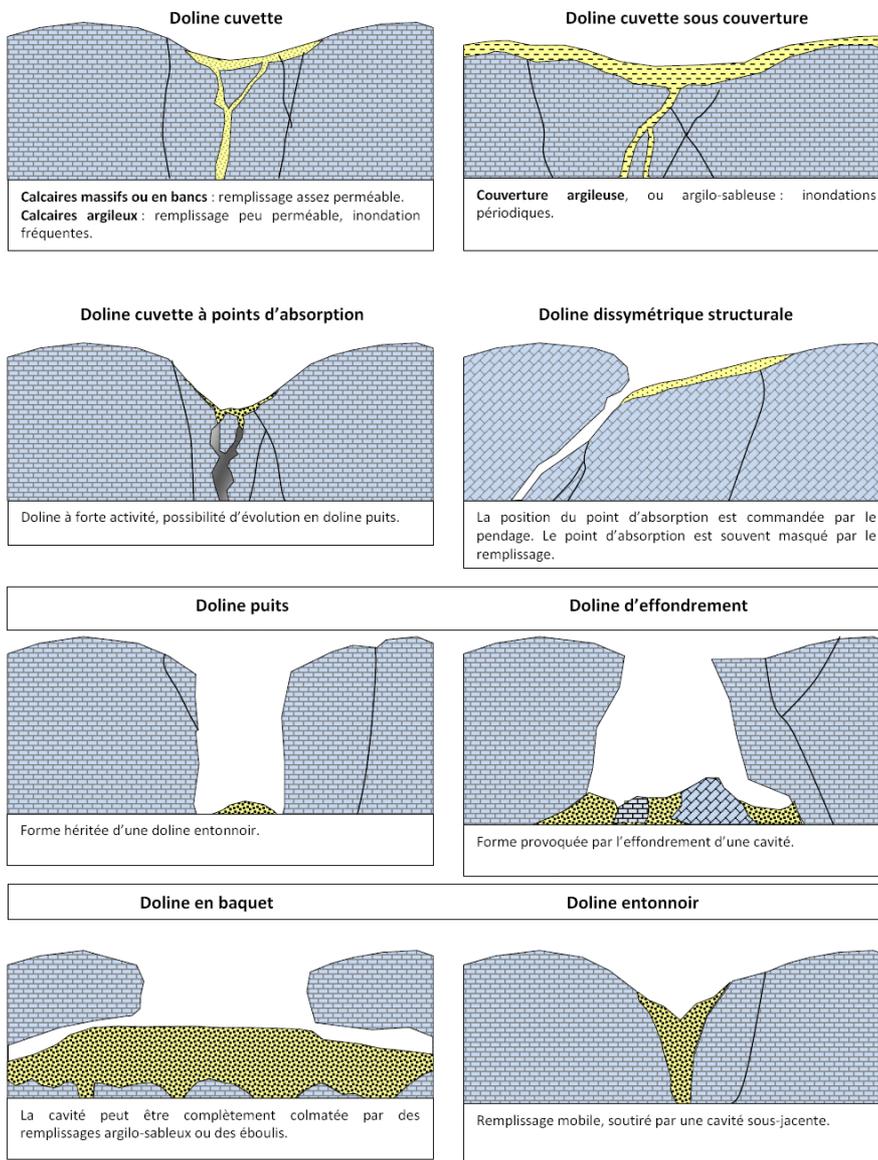
Une classification peut être faite des dépressions, à l'exemple de la classification en 5 formes principales sur le Causse du Quercy proposée par Astruc et Simon-Coinçon, mais qui est également valable et décrite par Ford & Williams (1993). Ces derniers distinguent les dolines initiées par la recharge et dont le moteur est la dissolution, les dolines d'effondrement, les dolines de subsidence (effondrement progressif sans rupture apparente du sol) et les dolines sous une couverture de type régolithe, dite de suffosion (processus de dissolution accompagnée de transport de fines).

- les **dolines** : dépressions circulaires, parfois elliptiques d'un diamètre d'une dizaine à centaine de mètres, pouvant atteindre de manière exceptionnelle plusieurs centaines de mètres de diamètre ; leur profondeur peut varier de quelques mètres à une trentaine de mètres.
- les **dolines puits** – dolines d'effondrement et de subsidence : formes provoquées par l'effondrement ou l'ablation par érosion du toit d'une cavité, localisées à l'aplomb des grands systèmes de conduits karstiques. Leurs composantes, essentiellement verticales, pouvant dépasser une centaine de mètres de profondeur, les assimilent à des abîmes. Les pentes peuvent être donc très abruptes avec à la base des cônes de matériel éboulé. La rupture de pente de manière brutale dans la morphologie est une caractéristique majeure. Ces dolines constituent des points d'infiltration préférentiels connectés avec le réseau karstique sous jacent (noyé ou dans la zone vadose).
- les **ouvalas** : ce sont des dépressions plus vastes, généralement formées par la coalescence de plusieurs dolines (Nicod J., 1972). Terme d'origine slave, les ouvalas sont de taille intermédiaire entre la doline et le poljé.
- les **poljés** : dépressions à fond plat, associées à un transit d'eau (source ou pertes) ; elles peuvent être associées (i) à la présence en bordure des formations karstiques, de formations sédimentaires permettant une accumulation de dépôts ainsi qu'un ruissellement, (ii) à une structure géologique singulière (zone d'effondrement de type graben, d'anticlinal pincé dans une structure chevauchante, etc..) et (iii) à la proximité du niveau de base,

donnant lieu à des inondations du poljé en périodes de hautes eaux et en période de base eaux à une vidange du poljé et la présence d'écoulement que temporaire en fonction de la charge hydraulique de l'aquifère.

- les **cuvettes héritées**, ce sont de vastes cavités paléokarstiques, partiellement déblayées de leur remplissage d'altérites argilo-sableux, d'éboulis et de grèze. Elles ont des dimensions décamétriques à kilométriques. Ce type de formes est très fréquent sur le Causse du Martel, par exemple.

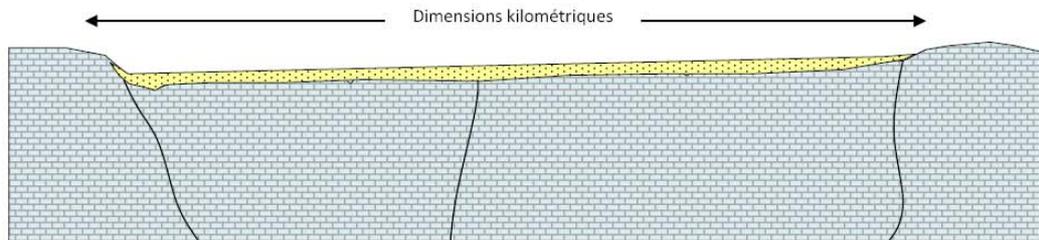
Planche annexe n° 1



Les dépressions karstiques sur les causses du Quercy. Extrait de Quercy-Recherche n° 83, janvier février 1996. Texte actualisé en août 2008 (Jean-Guy Astruc et Régine Simon-Coinçon) .

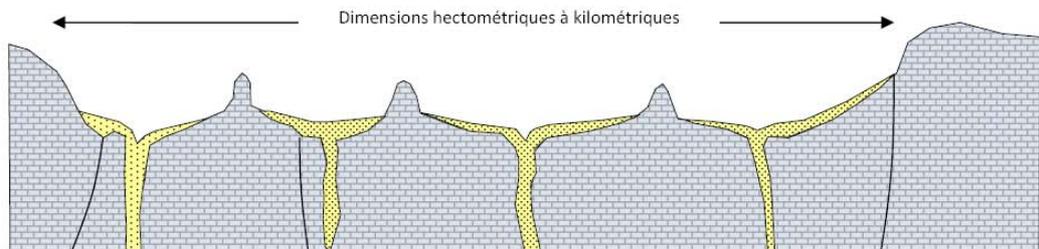
Planche annexe n° 2

POLJÉ



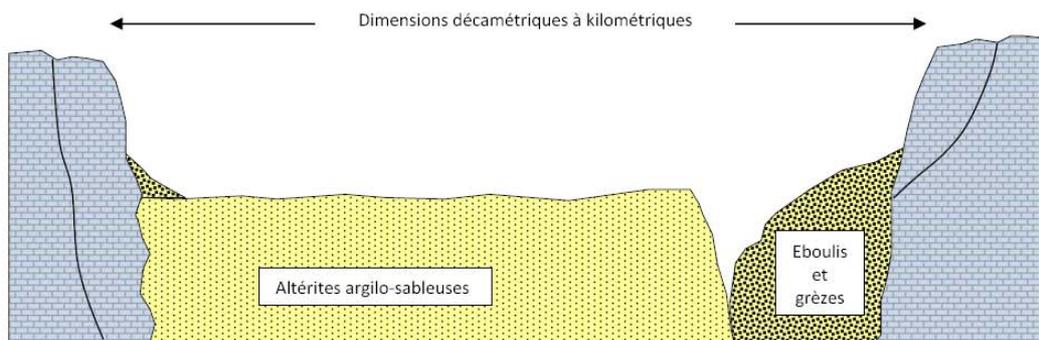
Les vastes cuvettes à fond plat des Alix (Rocamadour) et de Saint-Géry (Causse de Pasturat) sont des formes batardes entre la méga-doline et le poljé. Elles possèdent des remplissages épidermiques et une zone d'absorption peu marquée.

OUVALA



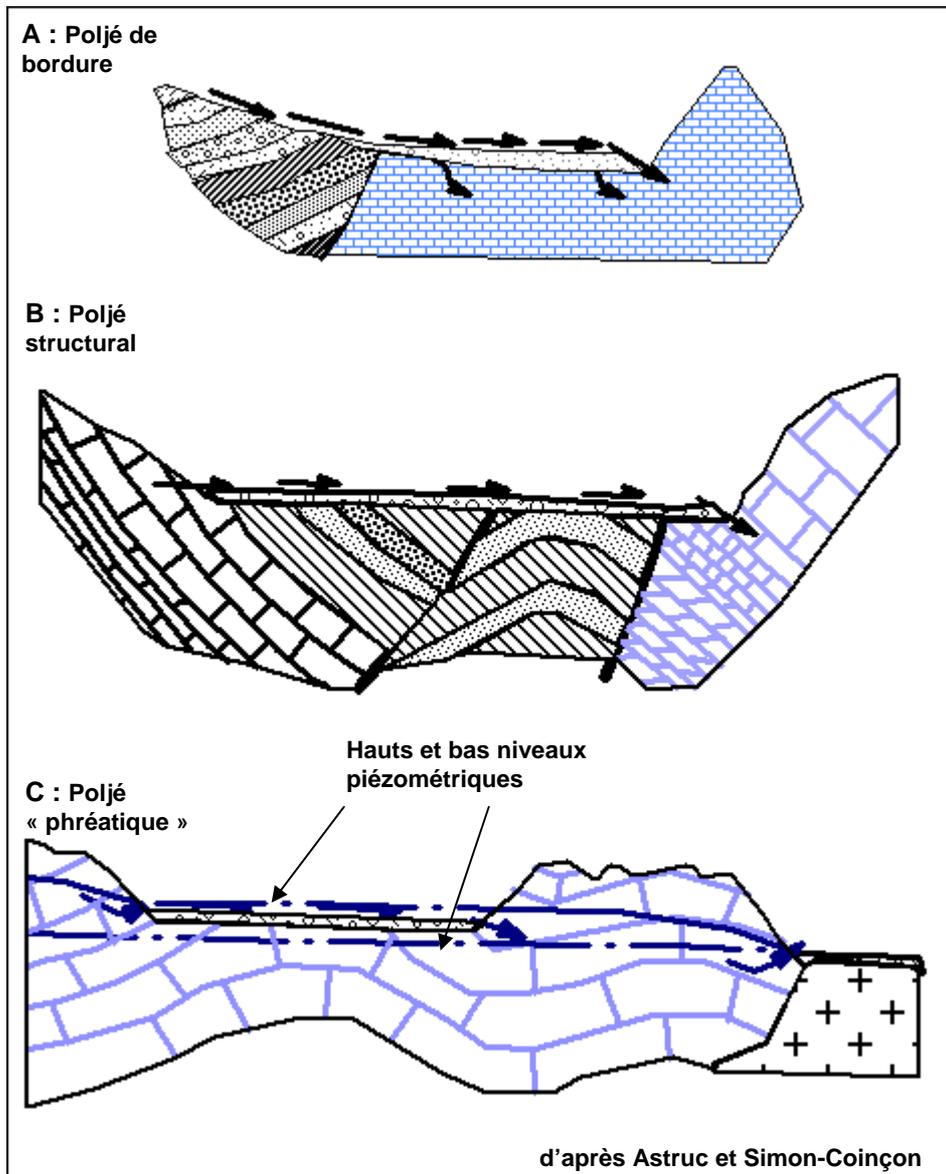
Forme résultant de la coalescence de plusieurs dolines, les hums sont des cloisons résiduelles.

CUVETTE HÉRITÉE



Cavité paléokarstiques partiellement déblayée de son remplissage argilo-sableux par soutirage. Forme abondantes sur le causse de Martel.

Les dépressions karstiques sur les causses du Quercy. Extrait de Quercy-Recherche n° 83, janvier février 1996. Texte actualisé en août 2008 (Jean-Guy Astruc et Régine Simon-Coinçon) .



Annexe 2

Détermination détaillée du critère S pour des zones spécifiques

Pour la réalisation de cartes de sol à l'aide d'une tarière et de fosses d'observation, les éléments suivants doivent être observés :

- Profondeur

Le rapide classement des sols selon leur profondeur montre de grandes fourchettes pour l'estimation de la capacité de stockage en eau en fonction de la texture et de la pierrosité des sols. La profondeur ne renseigne en rien sur la perméabilité du sol.

EPAISSEUR		Se	<CS<
absence de sol	< 10 cm	4	0 - 20 mm
sol très peu profond	10-40	3	5 - 80 mm
sol peu profond	40-70	2	20 - 140 mm
sol moyennement profond	70-100	1	35 - 200 mm
sol profond	>100 cm	0	40 - ?? mm

La seule profondeur du sol ne peut donc donner qu'une carte S très imprécise, ou une localisation des zones S4 uniquement.

- Pierrosité

Les sols caillouteux à très caillouteux (> 40% et 60% d'E.G.) diminue la réserve hydrique de près de la moitié et jusqu'au quart de la réserve d'un même sol sans cailloux. Nous pouvons estimer que S sera généralement diminué d'un point pour les sols caillouteux, et de deux points pour les sols très caillouteux :

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

- Texture

Grace au coefficient de réserve hydrique ci-dessus, la texture permet de préciser la CS en fonction de la profondeur du sol ou de ces différents horizons.

En combinant ce critère avec les deux précédents, le tableau ci après permet d'estimer la CS et une valeur de S en faisant varier les valeurs d'épaisseur et de pierrosité

NB : Le tableau ci-dessous permet de déterminer S en entrant les valeurs profondeur et pierrosité sur la ligne de la texture déterminée. S est proposé selon la classe contenant la valeur de CS obtenue (double clic sur le tableau).

METHODE PAPRIKA									
CRITERE D'ATRIBUTION DU FACTEUR S									
Classes de CS									
prof. min	prof. max	S							
0	30	4							
30	60	3							
60	100	2							
100	150	1							
150		0							
TEXTURE									
Argile %	Sable %	TEXTURE (triangle GEPPA)	te (mm/cm) d'après INRA LAON	Epaisseur	Pierrosité	CS	S		
A<12%	S >60%	Sg	0.5	10	0%	5	4	sols sableux filtrants	
		SS	0.7	50	0%	35	3		
		S	1	150	0%	150	1		
		SL	1.1	10	10%	9.9	4	Sols limono sableux à limoneux	
		LS	1.2	80	0%	96	2		
LL	1.3	160	0%	208	0				
A>12%	S >60%	SA	1.35	100	0%	135	1	Sols sablo-argileux à argilo sableux	
		AS	1.5	40	40%	36	3		
		SAL	1.5	50	0%	75	2		
	S <60%	AS	1.6	100	0%	160	0	sols très argileux (A>35%): moins de stockage et plus de ruissellement	
		A	1.7	160	70%	81.6	2		
		ALS	1.75	40	0%	70	2		
		LSA	1.6	30	0%	48	3	Texture moyenne	
		L	1.75	80	0%	140	1	Sol limoneux	
		LAS	1.75	20	0%	35	3	Texture moyenne	
AL	1.8	120	70%	64.8	2				
LA	1.95	50	0%	97.5	2				



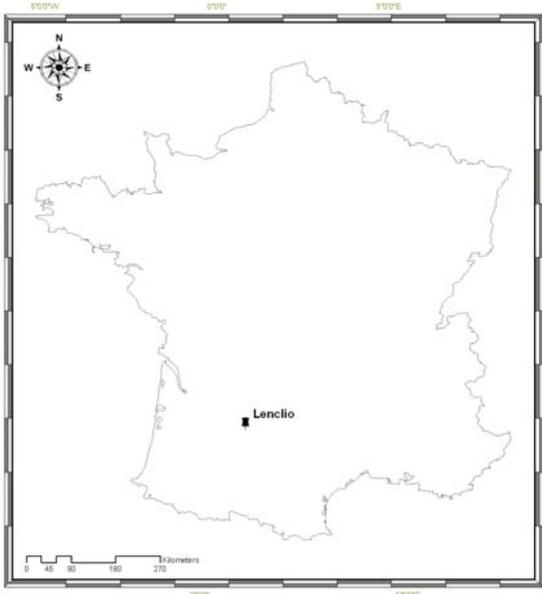
Annexe 3

Fiches de synthèse des systèmes karstiques ayant fait l'objet de test au cours du développement de la méthode PaPRIKa

Fiche de synthèse des sites caractérisés à l'aide de la méthode PaPRIKa	
Dénomination du site :	<i>Blagour de Chasteaux et Sorpt</i>
Superficie en km² :	75km ²
Situation géographique :	 <p>Département de Corrèze (19) A proximité de Brive-la-Gaillarde Coordonnées Lambert II étendu X : 529389 - 539920 Y : 2001823 - 2012180</p>
Contexte géologique :	<p><i>Causse de Martel, au sud du bassin de Brive.</i> <i>Aquifère développé dans les calcaires oolithiques et bioclastiques de Dogger. Structure tabulaire, incliné vers le SW. Le Bathonien moyen intercalé par des marnes noires.</i> <i>Bassin d'alimentation de la perte de la Couze constitué par des grès triasiques, dolomies et argiles d'Hettangien, calcaires de Sinemurien (Limargue)</i> <i>Couverture de Tertiaire (Sidérolithique)</i></p>
Caractéristiques hydrogéologiques :	<p><i>Sorpt : système karstique uniaire non capté – débit moyen annuel : 0.333 m³/s (Muet, 1985) [cycle 1981-1982]</i> <i>Blagour de Chasteaux : système karstique binaire capté au niveau de : Résurgence du Blagour de Chasteaux (IBSS : 07851X0049/HY)</i> <i>Forages de la vallée d'Entrecors (IBSS : 07851X0106/F1)</i> <i>débit exploité : 150 m³/h par puits (2 ouvrages)</i> <i>débit moyen annuel de 0.633 m³/s (Muet, 1985) [9 cycles hydrologiques]</i></p>
Données disponibles :	<p><i>Carte topographique et MNT 25 m, IGN</i> <i>Carte géologique 1:50000 (Brive-la-Gaillarde, 785, XXI-35 ; Souillac, 809), BRGM</i> <i>Carte pédologique, INRA</i> <i>Thèses Ph. Muet (1985), P. Marchet (1991)</i> <i>Essais de traçage, hydrogrammes des sources</i></p>
Acquisition de données de terrain :	<p><i>Repère des avens et des dolines</i> <i>Description de la lithologie et de la fracturation de la roche aux affleurements</i> <i>Description de l'épikarst</i> <i>Description des sols (sondages à la tarière)</i></p>
Acteur(s) et encadrant(s) :	<p><i>Stagiaire : Christophe Paris</i> <i>Master : M2 Ressources en Eau</i> <i>Etablissement : Ginger Environnement (Limoges), Institut EGID Bordeaux 3</i> <i>Encadrants :</i> <i>Philippe Muet, Hydrogéologue, Ginger Environnement, agence de Limoges</i></p>

Fiche de synthèse des sites caractérisés à l'aide de la méthode PaPRIKa	
Dénomination du site :	Fontaine sous Préaux
Superficie en km² :	36,7km ²
Situation géographique : <i>Département de Seine-Maritime (76) A deux kilomètres de nord de la ville de Rouen Coordonnées Lambert II étendu X : 513808 - 521614 Y : 2497127 - 2506699</i>	
Contexte géologique :	<i>Aquifère développé dans la craie de Crétacé supérieur (Cénomaniens au Campanien) Couverture argileuse épaisse issue de l'altération de la craie.</i>
Caractéristiques hydrogéologiques :	<i>Haute vallée de Robec, karst sous couverture, système karstique unaire capté au niveau des sources : Source des Cressonnères (IBSS : 01001X0153) Source Lefrançois (IBSS : 01001B0154) Source de l'If (IBSS : 01001B0155) débit exploité 12000 à 24000 m³/jour</i>
Données disponibles :	<i>Carte topographique et MNT 50 m, IGN Carte géologique 1 :50000 (Rouen EST XX-11), BRGM Carte piézométrique 1 :120000, BRGM Mesures de conductivité et de turbidité</i>
Acquisition de données de terrain :	<i>Repère des bétouilles et des dolines Description de la lithologie et de la fracturation de la roche aux affleurements Description des sols (sondages à la tarière)</i>
Acteur(s) et encadrant(s) :	<i><u>Stagiaire</u> : Virginie Leclerc <u>Master</u> : Géosciences, Environnement et Biodiversité, Génie Côtier. M1 Environnement, Sols, Eaux <u>Etablissement</u> : Université de Rouen <u>Encadrants</u> : M. Fournier, MdC Université de Rouen Barbara Leroy, Hydrogéologue, Agence de l'Eau Seine Normandie</i>

Fiche de synthèse des sites caractérisés à l'aide de la méthode PaPRIKA	
Dénomination du site :	Toulon
Superficie en km² :	54km ²
Situation géographique : Département de Dordogne (24) Le bassin inclut la ville de Périgueux. Coordonnées Lambert II étendu X : 471250 - 478800 Y : 2022100- 2034800	 <p>The map shows the outline of France with a small black square indicating the location of Toulon in the southwestern part of the country. The map includes a compass rose and a scale bar at the bottom.</p>
Contexte géologique :	<p>Anticlinal de Périgueux. Série sédimentaire de Turonien à Santonien. Le Turonien sup. représenté par des calcaires organiques (source de Cluzeau), le Coniacien inf. par des calcaires mameux, le Coniacien moyen par des calcaires compacts et le Santonien par des calcaires crayeux. Couverture importante des colluvions.</p>
Caractéristiques hydrogéologiques :	<p>En amont de la vallée de l'Isle. Système karstique unaire. L'Abime (IBSS : 07588X0009IABIME), débit exploité 1800 m³/h Le forage artésien du Cluzeau (IBSS : 07588X0004IF), débit exploité 300 m³/h (pompage que la nuit). Les deux sources sont en communication.</p>
Données disponibles :	<p>Carte topographique et MNT 50 m, IGN Carte géologique 1:50000 (Périgueux Est 759, Périgueux Ouest 758), BRGM Essais de traçage, Carte piézométrique aux enceintes de la source Rapport de protection du captage AEP, Jean Vouvé</p>
Acquisition de données de terrain :	<p>Description de la lithologie et de la fracturation de la roche aux affleurements Description des sols (sondages à la tarière) Repère des dolines</p>
Acteur(s) et encadrant(s) :	<p><u>Stagiaire</u> : Marie-Claudine Ogoula-Arondo <u>Diplôme d'expert</u> : Exploration et valorisation des ressources minérales <u>Etablissement</u> : Agence de l'Eau Adour Garonne, CESEV <u>Encadrants</u> : Pierre Marchet, Hydrogéologue, Agence de l'Eau Adour Garonne</p>

Fiche de synthèse des sites caractérisés à l'aide de la méthode PaPRIKa	
Dénomination du site :	<i>Lenclio</i>
Superficie en km² :	<i>69km²</i>
Situation géographique : <i>Département de Lot (46) Coordonnées Lambert II étendu X : 492541 - 502239 Y : 1933583 - 1943684</i>	
Contexte géologique :	<i>Causse de Mauroux. Drainé au nord par le Lot. Karst développé dans les formations du Kimméridgien. Le Kimméridgien inférieur : calcaires micritiques fracturés ; le Kimméridgien supérieur : alternance des banques calcaires et de banques marneux → petites nappes perchées. Légèrement incliné vers le N. Couverture épaisse constituée des formations molassiques, dans la partie sud du bassin.</i>
Caractéristiques hydrogéologiques :	<i>La zone d'étude correspond au bassin d'alimentation de deux sources : la source de Lenclio (captée) et la source de Bouyssac (non captée). Le bassin de la source de Lenclio est suspecté être moins étendu que celui de Bouyssac. Système karstique uniaire. Source de Lenclio (IBSS : 08558X0208/HY), débit de l'ordre de 0,3 m³/s</i>
Données disponibles :	<i>Carte topographique et MNT 25 m, IGN Carte géologique 1 :50000 (Fumel 855), BRGM Carte géologique 1 :25000 (Cartographie détaillée des terrains du Kimméridgien au sud de la source de Lenclio, commune de Mauroux, Lot), BRGM Essais de traçage, CALLIGEE Sud Ouest Carte géomorphologique, Laurent Bruxelles Chronique des hauteurs d'eau, SAUR Rapport d'expertise géologique, Jacques Rey</i>
Acquisition de données de terrain :	<i>Description de la lithologie et de la fracturation de la roche aux affleurements Description de l'épikarst Description des sols (sondages à la tarière) Repère des avens et des dolines</i>
Acteur(s) et encadrant(s) :	<i>Stagiaire : Stéphane Balayre Master : M2 Surveillance et Gestion de l'Environnement Etablissement : CALLIGEE Sud Ouest Encadrants : Christophe Subias, Hydrogéologue, CALLIGEE Sud Ouest</i>

Fiche de synthèse des sites caractérisés à l'aide de la méthode PaPRIKa	
Dénomination du site :	<i>Fontaine d'Orbe</i>
Superficie en km² :	<i>2,15km²</i>
Situation géographique : <i>Département de Pyrénées-Atlantiques (64) Coordonnées Lambert II étendu X : 346049 - 349949 Y : 1789700 - 1791550</i>	
Contexte géologique :	<i>Chainons Béarnais Karst développé dans les calcaires urgoniens de l'Aptien. Fort pendage (>70°)</i>
Caractéristiques hydrogéologiques :	<i>Le bassin est traversé par la vallée du Vert d'Arette. Système karstique unaire capté : Source d'Orbe (IBSS : 10516X0010/S), débit de l'ordre de 50l/s</i>
Données disponibles :	<i>Carte topographique et MNT 25 m, IGN Carte géologique 1 :50000 (Oloron Ste Marie 1051), BRGM Essais de traçage Chroniques de conductivité et de température Profils géophysiques (panneaux électriques)</i>
Acquisition de données de terrain :	<i>Description de la lithologie et de la fracturation de la roche aux affleurements Description de l'épikarst Description des sols</i>
Acteur(s) et encadrant(s) :	<i><u>Stagiaire</u> : Jessy Jaunat <u>Master</u> : M2 Géorressources <u>Etablissement</u> : Université Bordeaux 1, CETRA <u>Encadrants</u> : Frédéric Huneau, MdC Université Bordeaux 1 Frédéric Pretou, CETRA</i>

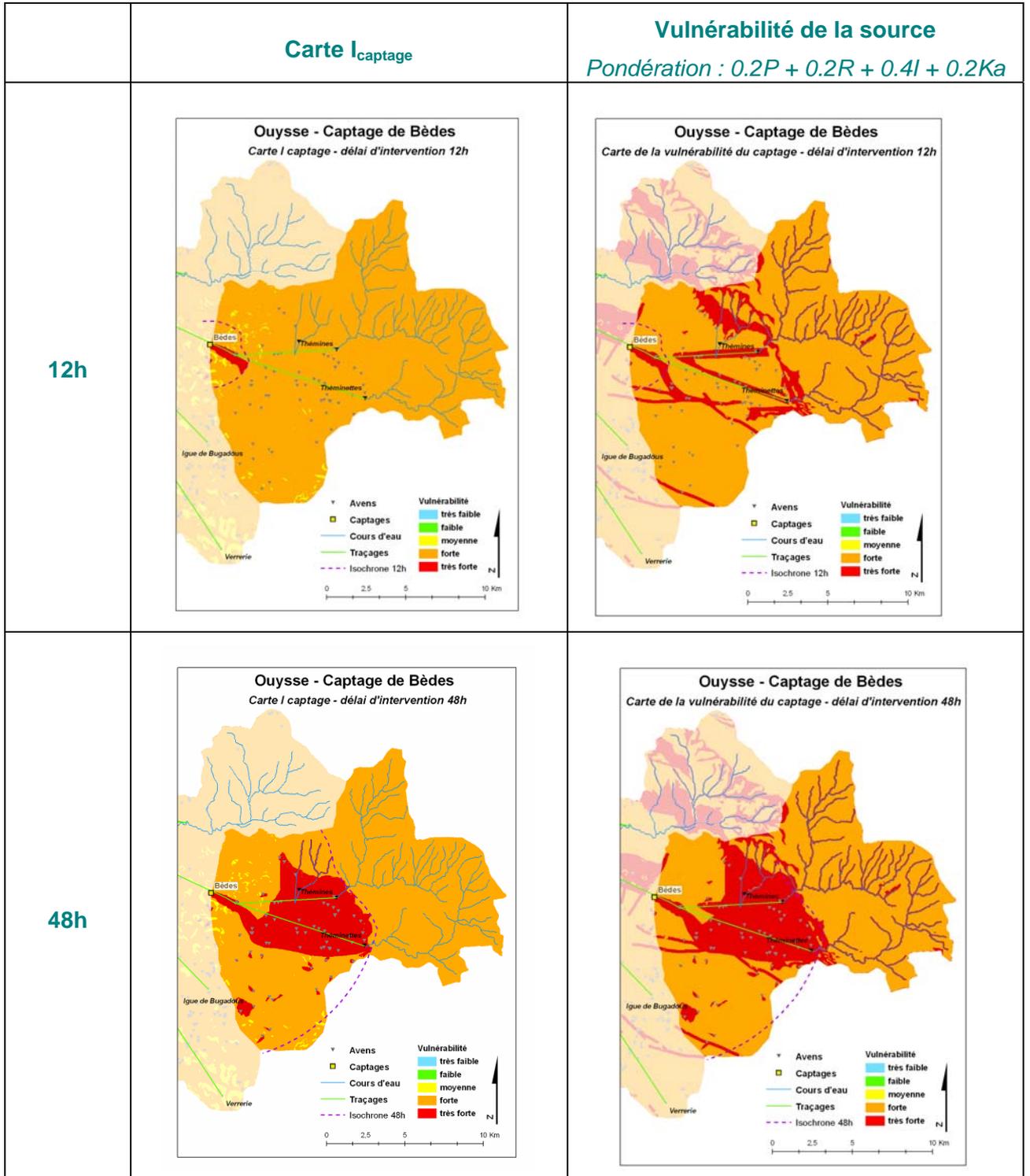
Fiche de synthèse des sites caractérisés à l'aide de la méthode PaPRIKa	
Dénomination du site :	Ouysses
Superficie en km² :	590km ²
Situation géographique : <i>Département de Lot (46) A proximité de la ville de Cahors. Au sein du Parc Naturel Régional des Causses de Quercy (PnrCQ) Coordonnées Lambert II étendu X : 532127 - 570647 Y : 1956594 - 1983178</i>	
Contexte géologique :	<i>Causse de Gramat, au sud du bassin de la Dordogne. Karst développé dans les calcaires du Jurassique (Aalénien à Kimmeridgien sup.). Structure tabulaire, incliné vers le SW. Le Bathonien à Bajocien intercalé par des marnes noires. Le Kimmeridgien sup. constitué des calcaires marneux. Bassins d'alimentation des pertes orientales constituées par des argiles de Toarcien, calcaires karstiques de Domerien, grès triasiques, dolomies et argiles d'Hettangien, calcaires karstiques de Sinemurien (Limarque), socle métamorphique de Paléozoïque (Ségala)</i>
Caractéristiques hydrogéologiques :	<i>Système karstique binaire capté : Forage des Bèdes (les Vitarelles), (IBSS : 08334X0007/GL), débit exploité 270094 m³/an Résurgence de Cabouy (IBSS : 08332X0009/HY), débit exploité 145654 m³/an Source de Fontbelle (IBSS : 08332X0043/L), débit exploité 356 972 m³/an</i>
Données disponibles :	<i>Carte topographique et MNT 25 m, IGN Carte géologique 1 :50000 (Gramat 833), BRGM Inventaires spéléologiques, C.D.S.L. Essais de traçage, BD PnrCQ Conductivité et chimie des eaux de la source Fontbelle</i>
Acquisition de données de terrain :	<i>Description de la lithologie et de la fracturation de la roche aux affleurements Description de l'épikarst Description des sols (sondages à la tarière)</i>
Acteur(s) et encadrant(s) :	<i>Stagiaire : <u>Konstantina Kavouri</u> Master : M2 Géoenvironnement, Géorisques et Information Environnemental Etablissement : UMR 7619 Sisyphé Université Paris 6, PnrCQ Encadrants : Valérie Plagnes, MdC Université Paris 6 Fayçal Rejiba, MdC Université Paris 6 Joël Tremoulet, Hydrogéologue, PnrCQ</i>

Fiche de synthèse des sites caractérisés à l'aide de la méthode PaPRIKA	
Dénomination du site :	<i>Cany-Barville</i>
Superficie en km² :	<i>38,7 km²</i>
Situation géographique :	 <p><i>Département de Seine-Maritime (76) En proximité des villes de Fécamp, Dieppe (côtes de la Manche) et Yvetot Coordonnées Lambert II étendu X : 470955 - 484556 Y : 2525229 - 2533990</i></p>
Contexte géologique :	<p><i>Aquifère développé dans la craie de Crétacé supérieur (Cénomaniens au Sénonien) Couverture argileuse épaisse issue de l'altération de la craie</i></p>
Caractéristiques hydrogéologiques :	<p><i>BV de la Durent, deux champs captant, systèmes karstiques unaires capté par forages :</i> <i>Champ de Cany-Barville, rive droite</i> <i>Forage ancien Cany (0057-4X-130), débit exploité 75 m³/h ; exploitable 120 m³/h, problèmes de turbidité</i> <i>Forage d'Ocqueville (0057-4X-138), débit exploité 60 m³/h ; exploitable 150 m³/h, problèmes de turbidité</i> <i>Forage nouveau Cany (0057-4X-148), débit exploitable 75 m³/h, pour remplacer les anciens forages</i> <i>Champ de Ouainville, rive gauche</i> <i>Forage nouveau Cany F2 (0057-4X-146)</i> <i>Forage nouveau Cany F3 (0057-4X-147), débit de 60 m³/h, fonctionnement en alternance</i></p>
Données disponibles :	<p><i>Carte topographique et MNT 50 m, IGN Carte géologique 1 : 50000 (Fécamp, XVIII-8-9 ; Doudeville, XIX-9), BRGM Essais de traçage Essais de pompage</i></p>
Acquisition de données de terrain :	<p><i>Repère des bétoures et des dolines Description de la lithologie et de la fracturation de la craie aux affleurements</i></p>
Acteur(s) et encadrant(s) :	<p><i>Stagiaire : Cédric Pinto-Ferreira Master : Géosciences, Environnement et Biodiversité, Génie Côtier M1 Environnement, Sols, Eaux Etablissement : Université de Rouen Encadrants : M. Fournier, MdC Université de Rouen G. Guillet, Conseillère Environnement, Syndicat Mixte des Bassins Versants Durdent-St Valéry-Veuillettes</i></p>

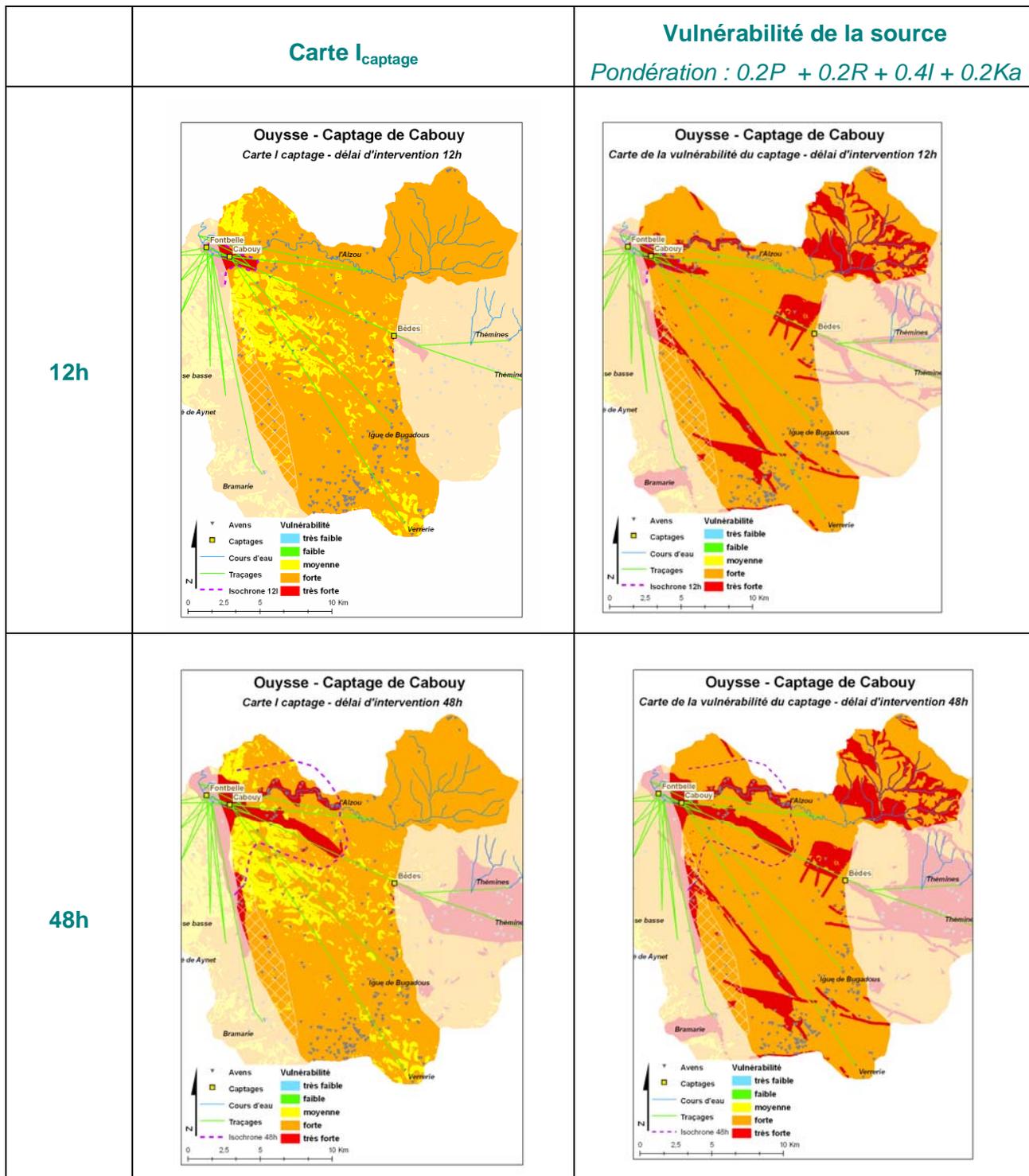
Annexe 4

Zoom sur les cartes de vulnérabilité de la source pour les captages du système karstique de l'Ouyse

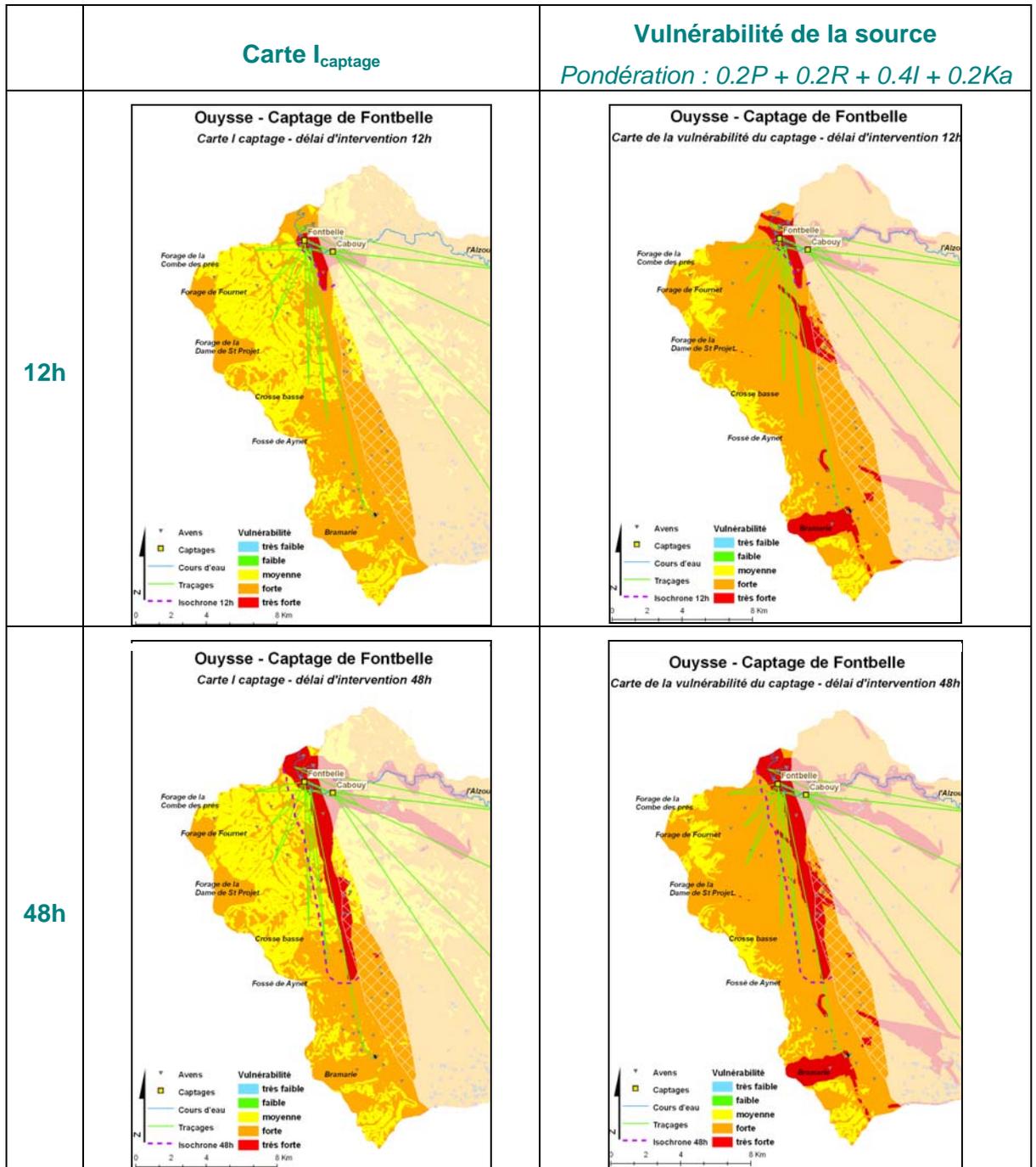
Zoom sur le forage de Bédés



Zoom sur la source de Cabouy



Zoom sur la source de Fontbelle





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service EAU, Unité RMD

1039 rue de Pinville

34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 90