


Partenariat 2010 – Savoirs – Action n°9



*Nouvelle approche de la
cartographie de
vulnérabilité des aires
d'alimentation de captage
d'eau souterraine en
contexte karstique*

Note technique

Dorfliger N. (BRGM)

Avril 2011

Contexte de programmation et de réalisation

Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés dans le cadre des activités de Service Public du BRGM avec le soutien de l'ONEMA (convention de partenariat n°1900/09 – Année 2010).

Les auteurs

Nathalie Dorfliger
Hydrogéologue
n.dorfliger@brgm.fr

Les correspondants

Onema : *Nicolas Domange, DAST, nicolas.domange@onema.fr*

Partenaire : *Jean-François Vernoux, BRGM, Service EAU, jf.vernoux@brgm.fr*

Référence du document : Dorfliger N. (2011) - Nouvelle approche de la cartographie de vulnérabilité des aires d'alimentation de captage d'eau souterraine en contexte karstique, note technique

Droits d'usage :	<i>Accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>Nationale</i>
Niveau géographique [un seul choix] :	<i>National</i>
Niveau de lecture [plusieurs choix possibles] :	<i>Professionnels, experts</i>
Nature de la ressource [plusieurs choix possibles] :	<i>Document</i>

Nouvelle approche de la cartographie de vulnérabilité des aires d'alimentation de captage d'eau souterraine en contexte karstique

N. Dorfliger (BRGM)

1. Etude et caractérisation du bassin versant hydrogéologique

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

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

2. Délimitation du BAC

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3. Cartographie de la vulnérabilité

3.1. CHOIX DE LA METHODE

Une **méthode multicritère à index avec système de pondération** dont les critères sont sélectionnés en fonction des caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques est sélectionnée. La méthode **PaPRIKa** (Dörfliger et al. 2010, BRGM RP-7527-FR). Cette méthode a été développée sur la base des méthodes antérieures spécifiques pour les aquifères karstiques telles que les méthodes EPIK (Dörfliger, 1996), RISKE (Pételet-Giraud et al. 2000) et RISKE2 ou RISKE modifiée (Plagnes et al. 2006). Les différentes modifications ont porté sur la meilleure prise en compte de la zone non saturée et de ses caractéristiques, de l'existence ou non d'un horizon aquifère épikarstique pouvant assurer un retard dans le transfert d'une contamination, de la définition du critère de karstification ainsi que de la caractérisation des bassins versants des pertes. L'acronyme de PaPRIKa signifie « Protection des aquifères karstiques basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification ».

La mise en œuvre de cette méthode consiste à identifier les caractéristiques qui définissent chaque critère indexées de 0 à 4, allant du moins au plus vulnérable. Un système de pondération est ensuite introduit traduisant l'importance relative des critères les uns par rapport aux autres. Afin de n'introduire aucun biais, il est basé sur une méthode mathématique de hiérarchisation. Un Système d'Information Géographique (SIG) est utilisé dans la méthode afin de faciliter l'établissement de la carte de vulnérabilité finale selon la taille et la complexité de la zone d'étude. La méthode PaPRIKa vise à fournir des documents directement utilisables par les décideurs » (Pételet-Giraud et al. 2000). La méthode a pour cible d'une part la ressource et d'autre part le captage. L'essentiel des critères retenus permet de caractériser le transfert depuis la surface vers la zone saturée, donc la ressource ; le transfert au sein de la zone saturée est prise en considération dans un deuxième temps, avec une notion de vitesse de transfert basée sur les résultats d'essais de traçage artificiel.

La méthode se déroule suivant 6 étapes essentielles 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 : (i) Séparation du bassin en 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 sont cartographiés ; (ii) Cartographie de chaque critère à l'échelle adaptée à la dimension du bassin d'alimentation (1/10 000^e à 1/50 000^e) et suivant les données disponibles.

Chaque critère est subdivisé en 5 classes matérialisées par un indice allant de 0 à 4. (ii) Discrétisation des cartes ainsi obtenues : la taille de la maille est définie en fonction du pas du **Modèle Numérique de Terrain** de la zone d'étude et des données disponibles (de préférence 25mx25m). (iii) Calcul de l'indice de vulnérabilité global V_g en chaque maille. L'indice de classe de chaque critère est multiplié par le facteur de pondération du critère considéré (qui traduit l'importance relative des critères entre eux vis à vis de la vulnérabilité). Les valeurs obtenues pour les 5 critères sont ensuite additionnées pour obtenir l'indice de Vulnérabilité global V_g . Cette étape revient à superposer les 5 cartes des critères indexés afin d'obtenir une représentation cartographique de la répartition de l'indice V_g . (iv) Etape de reclassification : La valeur de l'indice V_g est ensuite subdivisée en 5 classes équidistantes de vulnérabilité traduisant la sensibilité du milieu aux influences naturelles et anthropiques à un instant donné. Les modifications de l'occupation du sol ne sont pas prises en considération. (v) 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.

3.2. PARAMETRES PRIS EN COMPTE ET CLASSIFICATION

3.2.1. 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 50m 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 1).

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 1 : 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'infiltre 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 plurimétrique, 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 2).

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 2 : 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; Dörfliger, 1996; Suais et al., 1990) : dominante d'argiles, dominante de limons, dominante de sables. De la même façon trois classes de pierrosité ont été identifiées : 0-30% de cailloux, 15-60% de cailloux et > 60% de cailloux. Ces deux paramètres ont été croisés pour déterminer la nature du sol (Illustration 3) qui est ensuite croisée avec l'épaisseur des sols (Illustration 4).

		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 3 : 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	> 5m	S1	S1	S1	S2	S3
	1-5m	S1	S1	S2	S3	S3
	60-100cm	S2	S2	S3	S4	S4
	30-60cm	S3	S3	S4	S4	S4
	0-30cm	S4	S4	S4	S4	S4

Illustration 4 : 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 5) :

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

Illustration 5 : 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 drainance 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.

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 6).

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 6 : 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) < 15mètres, (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 7).

ZONE NON SATUREE (ZNS)		EPAISSEUR		
		> 15m	15-50m	> 50m
Fracturation	Faible-moyenne	$L_{ZNS} + 1$	L_{ZNS}	L_{ZNS}

	Importante	$L_{zns} + 1$	$L_{zns} + 1$	L_{zns}
	Forte au niveau de faille	4	4	4

Illustration 7 : Tableau de l'attribution de la valeur de l'indice ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation

3.2.2. 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 100m 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 8 et Illustration 9).

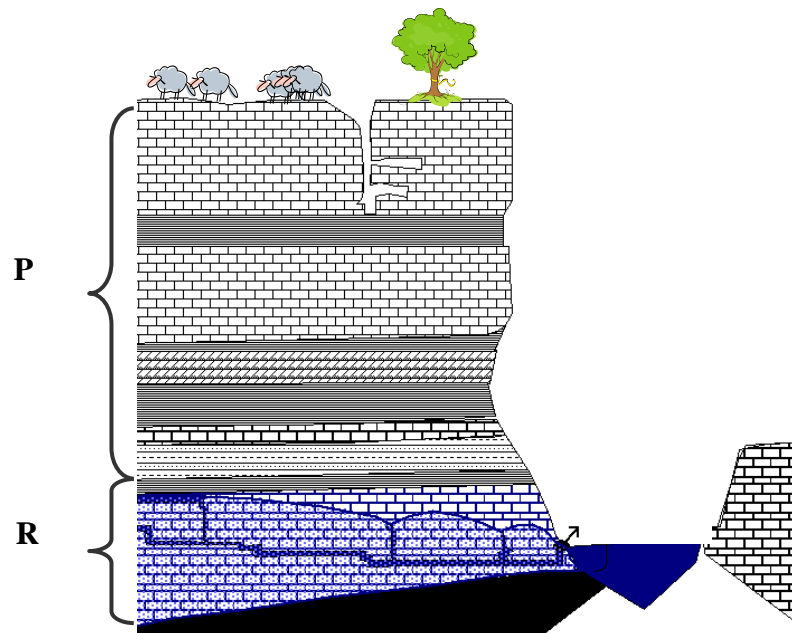


Illustration 8 : Définition du critère R dans le cas d'un aquifère karstique de type karst « classique ».

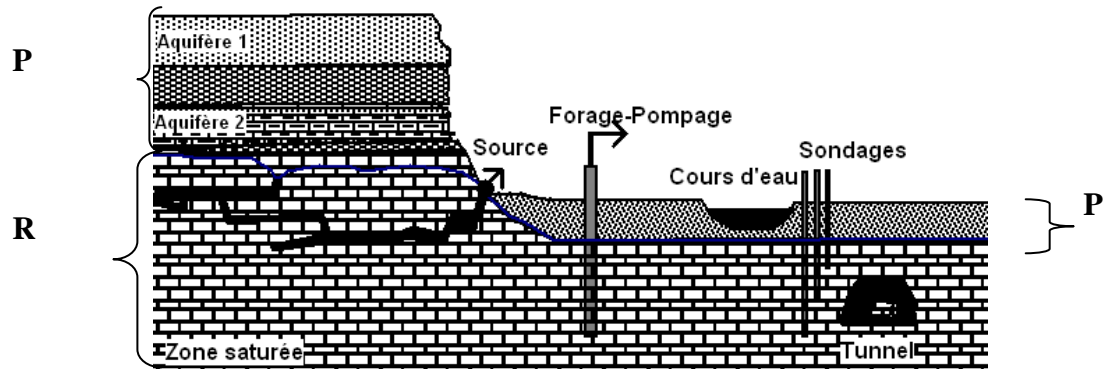


Illustration 9 : Définition du critère R au sein de la Zone saturée dans le cas d'aquifères superposés à partir de données à l'affleurement proche de la source, des données de forages-sondages, galeries et objets géotechniques de type tunnel.

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 100m 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 10) :

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	<p>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.</p>

Illustration 10 : 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.

3.2.3. 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 – lapiéz-, 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 lapiéz, 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 11 : 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.

3.2.4. 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 12) :

Critères		Superficie de l'aire d'alimentation (km ²)	
		< 10km ²	> 10 km ²
Position du captage	Captage de source, forages sur axe de drainage (conduits karstiques), pompage en source	Type 1	Type 2
		Débit annuel moyen faible Systèmes karstiques peu évolués ou peu fonctionnels	Débit annuel moyen fort Systèmes karstiques fonctionnels caractérisés par 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 12 : 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 13).

- **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.

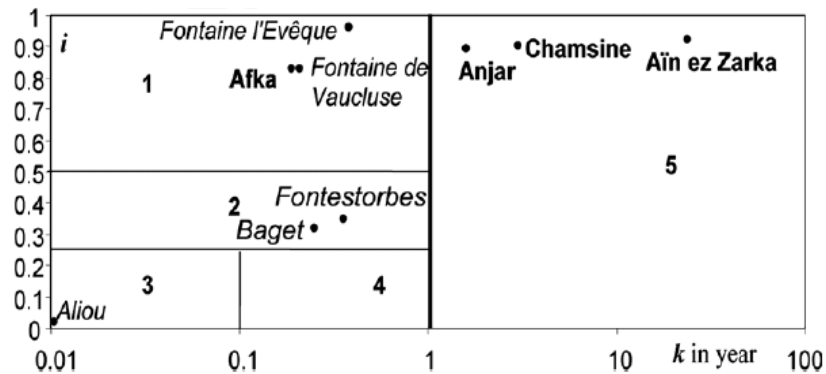


Illustration 13 : Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession [Mangin, 1975] (El Hakim & Bakalowicz, 2007)

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 14).

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 100m/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 évidence à l'aide d'essais de traçage sont importantes (> 100m/h). Domaines de référence 3 voire 4 de la classification de Mangin .	4

Illustration 14 : Tableau de description de l'indice Ka

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

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

La somme des poids 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 15).

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 15 : 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.

3.2.5. Reclassification de Vg

Cinq classes sont ensuite calculées à partir du calcul de Vg. La valeur finale de vulnérabilité varie donc entre 0 (vulnérabilité minimale) et 4 (vulnérabilité maximale) (Illustration 16). 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 16 : Tableau des classes de vulnérabilité globale

3.3. EXEMPLE D'APPLICATION

Le système karstique de Cany-Barville (Normandie) est développé dans la craie du Crétacé supérieur sous une épaisse couverture d'argiles à silex. L'eau est captée par 4 forages situés dans la vallée de la Durdent. Plus de détails sur cet exemple est donné dans le rapport BRGM RP-57527-FR et son annexe.

Critère P

Dans les zones amont des bétoires, la couverture argileuse favorise le ruissellement. L'indice P4 (état de surface) est donc donné sur l'ensemble des bassins d'alimentation des bétoires. Pour le sol, l'épaisse couverture d'argiles à silex (>5m) sur les plateaux est classée en S1. Elle est moins épaisse (20cm à 1m) 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 10m 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 17).

Cany - Barville

Elaboration de la carte P

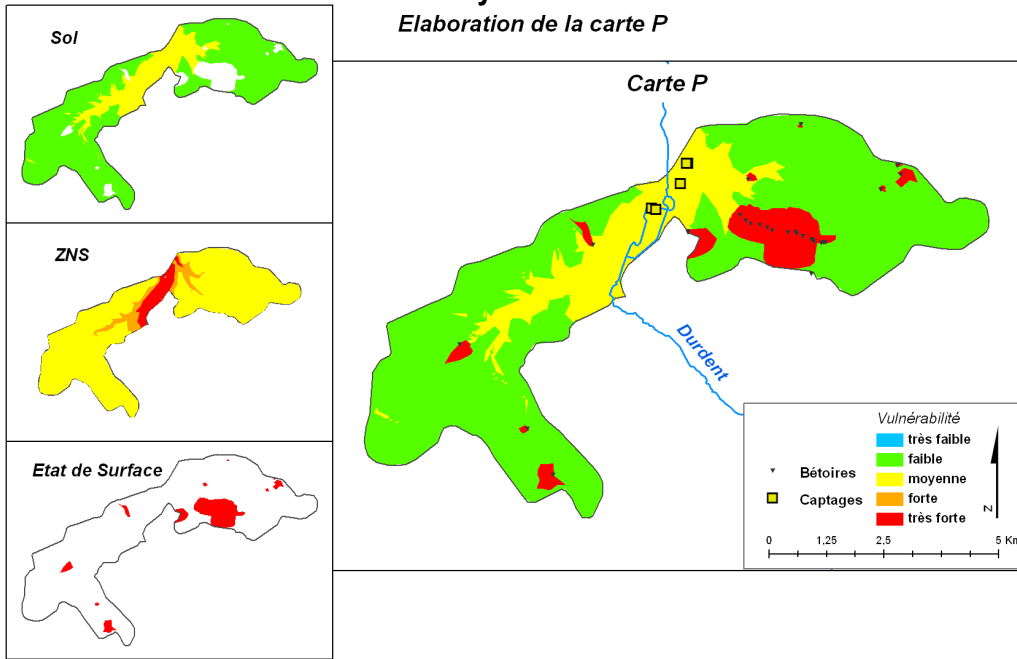


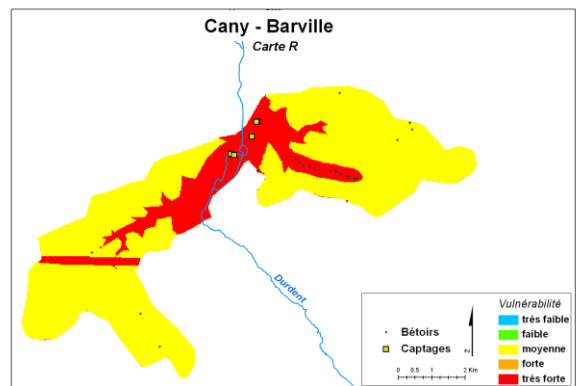
Illustration 17 : Carte du critère P du système de Cany Barville

Critère R

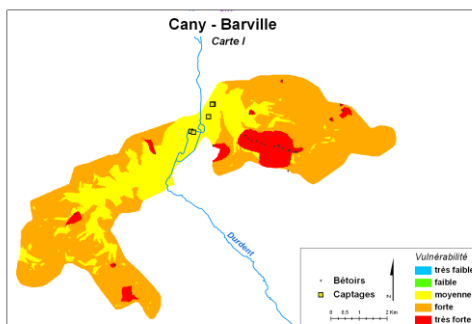
Le réservoir est dans la craie caractérisée au niveau régional en **R2**.

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 18).

Illustration 18 :
Carte du critère
R roche du
réservoir pour
le site de Cany
Barville



Critère I



Les zones d'alimentation des bétouirs 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 19).

Illustration 19 : Carte du critère I pour le site de Cany Barville.

Critère Ka

La rive gauche de la Durdent est un système unnaire caractérisé par un fonctionnement karstique modéré **Ka2**. La rive droite de la Durdent est un système karstique unnaire mais très fonctionnel **Ka3**, comme attesté par les traçages réalisés

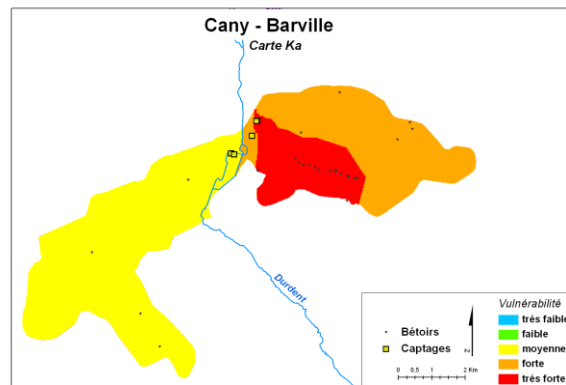


Illustration 20 : Carte du critère Ka de Cany Barville

Une zone caractérisée par de nombreuses bétouires alignées est suspectée d'être connectée avec deux des forages (00574X0148 et 00574X0130) via un conduit karstique, la zone est notée **Ka4** (Illustration 20).

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

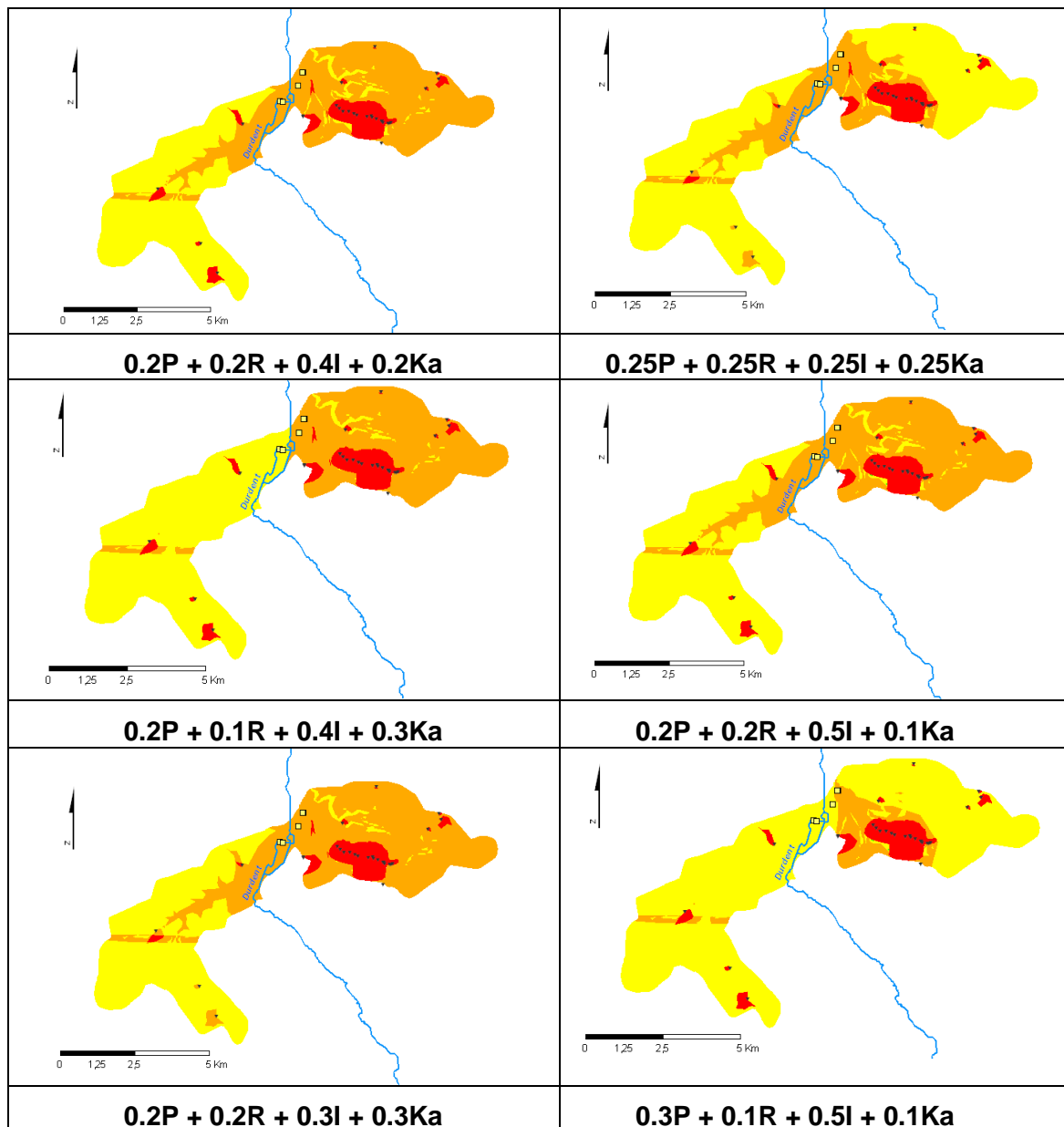


Illustration 21 : Cartes de vulnérabilité du site de Cany Barville

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 bétoires 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.