

NOTIONS GENERALES DE VULNERABILITE

Afin de comprendre la notion de vulnérabilité il apparaît important de rappeler quelques définitions :

- **Le risque de pollution** résulte du croisement d'un ou plusieurs aléas et d'un ou de plusieurs enjeux : $R(\text{isque}) = A(\text{léa}) \times E(\text{njeux})$.
- **Un aléa** suppose une approche probabiliste, il s'agit de l'application d'un stress, (une action polluante par exemple) sur un point, un axe ou un espace plus ou moins vulnérable du milieu naturel au regard des eaux souterraines dans le cadre de cette étude.
- **La vulnérabilité** est représentée par la capacité donnée à l'eau située en surface de rejoindre le milieu souterrain saturé en eau. La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions suivant les caractéristiques de ce milieu.

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Schnebelen et al., 2002) :

- la **vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines ;
- la **vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine 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.

La distinction des deux types de vulnérabilité est nécessaire car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

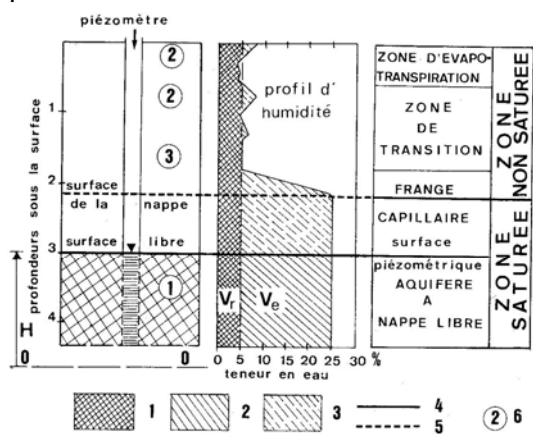
- **Les enjeux** représentent la cible qui ne doit pas être atteinte par les effets du stress sur le milieu naturel.

La notion de risque est donc étroitement liée à la définition des enjeux. Par défaut, dans l'étude d'une vulnérabilité intrinsèque, l'enjeu est représenté par l'eau souterraine mobilisable dans les nappes phréatiques quel qu'en soit l'usage.

- Le transfert des polluants dans le sol s'effectue d'abord à travers **la zone non saturée** (ZNS) avant d'atteindre la zone saturée.

La ZNS est la zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre. A cet endroit, la quantité d'eau gravitaire est temporaire, en transit.

Trois parties différenciées en fonction de leur teneur en eau la composent :



- Une zone d'évapotranspiration qui est soumise à d'importantes variations de la saturation en eau ;
- Une zone de transition où la teneur en eau correspond à la capacité de rétention du sol ;
- La frange capillaire qui, en plus de la percolation per descensum (recharge) correspond à l'eau de la nappe remontant par ascension capillaire.

Figure : Définition de la zone non saturée. (Hydrogéologie, G. Castany, 2000)

1, eau de rétention ; 2, eau gravitaire ; 3, eau capillaire ; 4, surface piézométrique ou surface libre ; 5, surface de la nappe

Pour qualifier cette **vulnérabilité intrinsèque** telle que décrite ci-dessus, un certain nombre de critères sont disponibles, ils sont associés aux ensembles souterrains dans lesquels ils interviennent et sont récapitulés dans le Tableau.

VULNERABILITE INTRINSEQUE		
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée
Topographie (pente)	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe (libre ou captive)
Pédologie (perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols)	Temps de transfert (perméabilité verticale)	Temps de résidence (dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères)
Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)		Relation eaux souterraines/eaux superficielles
	Structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile)	Piézométrie (sens et direction d'écoulement et évolutions selon la période du cycle hydrologique)
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Épaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)
		La recharge (recharge annuelle nette).
		Type de système hydrogéologique (caractères plus ou moins capacitif et transmissif)
Battement de nappe		
Fracturation (directions et densité)		

Tableau : Critères de vulnérabilité

L'exploitation de ces critères est souvent normalisée au travers de différentes méthodologies d'analyse de la vulnérabilité des eaux.

Ainsi, de nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998 b).

Parmi celles-ci les **méthodes dites « de cartographie à index avec pondération des critères »** (Point Count Systems Models, PCSM) **apparaissent les plus pertinentes** vis à vis des réalités de terrain. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994). La majorité de ces méthodes exploite un critère relatif à la morphologie du territoire étudié :

- soit la pente prise en compte directement au travers de sa valeur absolue
- soit la pente par un facteur indirect, reprenant la densité de drainage des réseaux hydrologiques de surface.

Au-delà du facteur pente, la nature des couvertures en place au-dessus des aquifères (leur capacité à laisser transiter les polluants) et l'épaisseur des terrains non saturés sont les critères prépondérants utilisés par différentes méthodes d'analyse de vulnérabilité.

Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998 b).

Elles peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Les **méthodes de cartographies à index** basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple) ;
- Les **modèles de simulation** : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen 2002). Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe ;
- Les **méthodes statistiques** : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude. Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

Les **méthodes de cartographie à index** comportent deux types d'approche : les systèmes hiérarchisés et les systèmes paramétrés. (N. Schnebelen et al., 2002)

- La méthode des systèmes hiérarchisés est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones (autres bassins ou autres systèmes aquifères). Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrogéologiques variés à moyenne ou grande échelle (régionale ou nationale) ;
- La méthode des systèmes paramétrés repose sur la sélection de paramètres (ou critères) considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination. Les systèmes paramétrés peuvent être classés en trois principaux groupes : systèmes matriciels, systèmes indexés et méthodes de pondération et d'indexation des paramètres. Chacun est adapté à un objectif différent : respectivement, petite échelle d'étude, échelle moyenne d'étude, mais non prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité, échelle moyenne d'étude et prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité.

Les **méthodes de cartographie à index avec pondération des critères** (Point Count Systems Models, PCSM) sont les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994).

Différentes méthodes développées et normalisées sont présentées ci-après, les deux premières méthodes présentées sont spécifiques du milieu karstique, elles sont citées pour mémoire car le milieu qui nous concerne est de type poreux/fracturé.

EPIK : C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensu-stricto (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997). Elle est basée sur quatre critères : Epikarst ; Protective Cover (couverture protectrice : sol) ; Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ; Karst network development (développement du réseau karstique).

RISKE : Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst (Petelet-Giraud *et al.*, 2000).

DISCO : La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Trois paramètres sont nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant d'un point quel conque du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage : le paramètre "discontinuités" ; le paramètre "couverture protectrice" ; le paramètre "ruissellement" englobe les phénomènes d'écoulement de l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires).

GOD : Ce système a été développé par Foster en 1987. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée.

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères : Type de nappe (**G**roundwater occurrence) ; Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class) ; Profondeur de la nappe (**D**epth to groundwater table).

DRASTIC : La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller *et al.* en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schnebelen *et al.*, 2002). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères : D : Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ; R : Recharge (recharge) ; A : Aquifer media (nature de la zone saturée) ; S : Soil media (nature du sol) ; T : Topographie (topographie, pente en %) ; I : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ; C : Conductivity (perméabilité de l'aquifère). La méthode DRASTIC est principalement utilisée pour la cartographie à petite échelle (Lyakhloufi *et al.* 1999).

SINTACS : La méthode SINTACS est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet *et al.*, 2000). Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien : S : Soggiacenza (profondeur de la nappe) ; I : Infiltrazione (infiltration) ; N : Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée) ; T : Tipologia della Copertura (sol) ; A : Caratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristique hydrogéologiques de l'aquifère) ; C : Conducibilità Idraulica (conductivité hydraulique) ; S : Acclività della Superficie Topografica (pente moyenne de la surface topographique).

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des facteurs de pondération variables selon les situations (Schnebelen *et al.*, 2002).

Autres méthodes :

Z. Alamy et C. Langevin (1989) procèdent à une analyse détaillée de la couverture de sol (Lallemand-Barrès, 1994). Les facteurs et critères retenus par ces auteurs, ainsi que la notation et le poids attribués aux critères sont résumés dans le tableau ci-après.

Paramètres	Classes				Poids
	0 - 5 % (5)	5 - 10 % (2)	10 - 15 % (1)	> 15 % (1)	
Pente	< 5 m (1)	5 - 2 m (3)	2 - 1 m (5)	< 1 m (5)	-
Épaisseur couverture	> 10 ⁴ (25)	> 10 ⁴ .10 ⁻⁶ (5)	10 ⁻⁶ .10 ⁻⁹ (3)	10 ⁻⁹ (2)	1
Perméabilité ou de l'affleurement	> 10 ⁴ (25)	> 10 ⁴ .10 ⁻⁶ (5)	10 ⁴ .10 ⁻⁹ (3)	< 10 ⁻⁹ (2)	1
Perméabilité sous-sol non saturé	sans (5)	temporaire (3)	temporaire (2)	permanente (1)	1/3
Hydromorphie	> 20 m (1)	5 - 20 m (3)	1 - 5 m (5)	< 1 m (25)	1/2
Profondeur nappe	sable (3)	gravier (5)	argile sableuse limon (2)	argile (1)	-
Nature couverture	sans (1)	1 direction proche (3)	2 directions proches (5)	champ (25)	-
Fracturation	(1)	(3)	(5)	(25)	-
Densité de fracturation	(1)	(3)	(5)	(25)	-

Tableau 1 : Paramètres valeur et poids retenus pour l'élaboration d'une carte de vulnérabilité (Alamy, Langevin, 1989).

Dans le cadre d'une application à la nappe de la craie dans le secteur de Guines (Pas-de-Calais), **J. Ricour (1988)** propose les paramètres suivants comme critères pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité. La carte de vulnérabilité obtenue est superposée à des facteurs à caractère évolutif ayant trait à l'occupation des sols pour constituer une carte de sensibilité aux risques de pollution (Lallemand-Barrès, 1994).

	Paramètre	Poids global	--- Echelle de vulnérabilité croissante et poids relatifs de chaque paramètre → +			
			Argile sur craie	Alluvions sur craie	Limons sur craie	Craie en affleurement
Carte de vulnérabilité	Lithologie et recouvrement	1	0	1	2	3
	Topographie	0,5	Pente > 10 % 1	5 < pente ≤ 10 % 2	1 < pente ≤ 5 % 3	pente ≤ 1 % 4
	Profondeur du niveau sous le sol	0,5	profondeur > 30 m 1	15 < profondeur ≤ 30 m 2	5 < profondeur ≤ 15 m 3	profondeur ≤ 5 m 4
	Zone fracturée	1	Zone linéamentaire susceptible de correspondre à des zones fracturées 1			
Carte de sensibilité	Typologie de l'occupation du sol (urbanisation, routes, forêts...)	Superposition par classe à la carte de vulnérabilité	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
			forêts, friches	milieu agricole et marécageux	milieu urbain et industriel, routes, carrières, décharges...	

Tableau 2 : Paramètres pris en compte dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité et de sensibilité du milieu souterrain aux risques de pollution (Ricour, 1988).

S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991), pour élaborer les cartes de vulnérabilité au Guatemala, retiennent les paramètres présentés dans le tableau ci-après.

Images	Variables Paramètres	Echelle de vulnérabilité et poids relatif de chaque paramètres										Poids Global
		(Très vulnérable)					(Peu vulnérable)					
Zone non saturée	Epaisseur	< 10 m		10-20 m		20-30 m		30-50 m		> 50 m		5
	Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 5	Initiale 3	Finale 15	Initiale 10	Finale 50	Initiale 25	Finale 125	Initiale 50	Finale 250	
Zone de recharge	Type de milieu					de recharge		hors zone de recharge		urbain		3
	Valeur attribuée					Initiale 1	Finale 3	Initiale 10	Finale 30	Initiale 25	Finale 75	
Densité de drainage	Degré de perméabilité	très perméable		perméable		semi-perméable		ruisselant		très ruisselant		2
	Valeur attribuée	Initiale 1	Finale 2	Initiale 2	Finale 4	Initiale 3	Finale 6	Initiale 10	Finale 20	Initiale 25	Finale 50	
Fracturation	Niveau probable de fracturation					très fracturé		peu fracturé				1
	Valeur attribuée					Initiale 1	Finale 1	Initiale 25	Finale 25			

Tableau 3 : Paramètres pris en compte dans l'élaboration de la carte vulnérabilité (valeur finale = valeur initiale * poids global) (Munoz, Langevin, 1991).

Dans l'étude de **M.F. Suais (1990)** où les critères de vulnérabilité sont assimilés aux critères d'évaluation des risques de pollution, on peut retenir la proposition de nouveaux critères relatifs aux sols, qui sont des critères non plus stables, mais variables dans le temps ou par intervention humaine, tels que degré d'imperméabilisation, densité et nature du couvert végétal et densité de drainage (cf figure ci-contre).

Figure : Critères relatifs à la surface du sol (M.F. Suais et al., 1990)

