

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
74, rue de la Fédération - Paris-15ème - Tél. 783 94-00
DIRECTION DU SERVICE GEOLOGIQUE ET DES LABORATOIRES
Boîte Postale 818 - 45-Orléans-La Source - Tél. 87-06-60 à 64

VULNERABILITE DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE A LA POLLUTION

BASES DE SA CARTOGRAPHIE

par

J. MARGAT



Département d'Hydrogéologie
45 - Orléans-La Source
B.P. 818 - Tél. 87-04-69

68 SGL 198 HYD

Novembre 1968

Résumé

La vulnérabilité des nappes souterraines à la pollution est fonction d'un ensemble de facteurs agissant différemment selon les types de pollution à craindre et aussi selon que l'on considère la "production" de la pollution (la cause) ou la durée de sa persistance (l'effet).

L'objet de cette note préliminaire est de proposer une définition de ces facteurs en les concevant comme les bases possibles d'une cartographie de classification fondée sur la combinaison de diverses zonalités :

- conditions géologiques au toit de l'aquifère : nappe libre ou captive
- profondeur de surface libre
- perméabilité verticale (zone non saturée)
- débit d'écoulement unitaire
- liaison nappe/cours d'eau de surface.

L'établissement de cartes de vulnérabilité, dont des prototypes expérimentaux seront mis à l'étude en 1969, serait de nature à fournir des éléments de décision à toute autorité chargée de prendre des mesures préventives ou conservatoires visant à la protection des ressources en eau, de même qu'à leur permettre d'apprécier rapidement, les degrés de gravité et les risques de persistance de pollutions accidentelles.

Ce travail préparatoire a été entrepris dans le cadre des études générales d'hydrogéologie, réalisées par le Département d'hydrogéologie. Il a été réalisé avec le concours de l'ensemble des ingénieurs du département.

1. Notion de "vulnérabilité" à la pollution

On peut la définir comme le fait pour une nappe souterraine, d'être plus ou moins exposée par les conditions naturelles à un risque donné d'être polluée (chimiquement surtout). C'est donc une qualité potentielle, une "polluabilité", indépendante de l'existence actuelle de foyers de pollution.

Mais les conditions qui assurent une protection plus ou moins efficace n'interviennent pas toutes de la même manière ni dans la même mesure selon les différents types de pollution pouvant survenir.

Il faut aussi distinguer :

- l'accès plus ou moins facile d'un polluant à une nappe à partir d'une action génératrice, c'est-à-dire la cause,
- la persistance ensuite, plus ou moins durable (si la cause n'est pas entretenue) de la pollution survenue, c'est-à-dire l'effet.

On examinera donc successivement ces deux aspects de la pollution des eaux souterraines, avant de rechercher les facteurs agissant sur l'un et l'autre. La notion de vulnérabilité doit donc comprendre à la fois ce qui favorise la cause et ce qui entretient l'effet.

2. Différents types de pollution

Rappelons qu'on entend par pollution : toute action, toute introduction volontaire ou accidentelle de corps altérant la qualité chimique ou physique naturelle de l'eau souterraine.

On peut ramener à 6 principaux les types ou procédures de pollution à considérer : (cf. rapport DS 63 A 127)

- a) Pollution localisée à partir d'un dépôt, d'un déversement ou d'un épandage sur la surface du sol. Le foyer peut être fixe et délimité, permanent ou temporaire, ou accidentel et de localisation aléatoire.

Dans ce cas le polluant doit transiter jusqu'à la nappe par infiltration à travers la zone non saturée plus ou moins facilitée et entraînée par l'infiltration des eaux météoriques, notamment lorsque les produits nocifs sont à l'état solide (suspensions).

Exemples : dépôts de déchets mal isolés, fuite de réservoir, accident de transporteur.

- b) Pollution localisée à partir d'injection de subsurface, notamment par des ouvrages absorbants, ne pénétrant pas jusqu'à la nappe.

Dans ce cas encore, un transit s'opère dans la zone non saturée, mais plus court.

Exemples : trop-pleins de fosses septiques, fuite de "pipe-line", de canalisation enterrée ou d'égouts, rejets d'effluents en puisards ou puits perdus courants.

- c) Pollution localisée à partir d'injection dans des ouvrages absorbants pénétrant dans la nappe et utilisés pour le rejet d'effluents ou d'eau résiduaires. Dans ce cas la pollution de la nappe est directe et immédiate.
- d) Pollution plus ou moins localisée "induite" par des captages d'eau souterraine provoquant une réalimentation à partir d'un cours d'eau de surface pollué.

Dans ce cas la pollution de la nappe est directe et elle se propage dans la direction du captage qui la provoquait.

L'intrusion d'eau de mer dans une nappe souterraine littorale, sous l'effet de pompage, est un cas particulier : la limite d'alimentation est alors voisine du rivage. Un autre type de "pollution induite", laissé de côté ici est l'attrance d'eau de qualité médiocre ou inutilisable d'une couche aquifère plus profonde, sous l'effet d'un captage, par drainance.

- e) Pollution plus régionale et indirecte, conséquence de la pollution de cours d'eau de surface alimentant naturellement une nappe souterraine. (cf. rapport DS 65 A 96).
- f) Pollution générale à partir de précipitations momentanément contaminées. Le trajet jusqu'à la nappe se fait comme dans le cas (a).

N.B. Dans ce cas, les types (d) et (e) se trouvent ipso-facto réalisés, mais l'effet sur l'eau des cours d'eau peut-être beaucoup moins durable.

3. Notion de durée de pollution

Il faut distinguer :

- 3.1. Le temps séparant l'action initiale génératrice de pollution au sol, qu'elle soit isolée et accidentelle, ou répétée, voire entretenue, du moment de l'arrivée du polluant dans la nappe, dans la couche aquifère. Ce temps de parcours est plus ou moins long dans les cas (a), (b) et (e), -il est fonction de la durée du transfert en milieu non saturé- de même que dans le cas (d) -il est fonction de la distance et de la vitesse d'écoulement réelle maximale de l'eau de la nappe-. Il est quasi nul dans le cas (c).
- 3.2. La durée de persistance de la pollution de la nappe, d'abord dans l'environnement du foyer de pollution, s'il est ponctuel ou localisé, puis sur l'ensemble des trajectoires de l'eau entre le point ou l'aire de départ et la limite d'émergence de la nappe. Elle est liée à la vitesse de transit réelle de l'eau et à la durée de renouvellement complet de la nappe dans la partie de la couche aquifère considérée.

Mais la rapidité d'"effacement" de la pollution d'origine temporaire en un point donné a pour contre-partie une rapidité de propagation de la pollution entraînée par l'écoulement de la nappe.

La protection naturelle d'une nappe contre les risques de pollution devra alors comprendre :

- les facteurs limitant ou retardant la propagation du polluant à travers la zone non saturée, -son accès à la nappe- donc allongeant la durée 3.1.
- les facteurs accélérant l'"effacement" de la pollution, l'évacuation de l'eau polluée par renouvellement naturel, donc écourtant la durée 3.2., du moins dans le cas où la pollution n'est pas entretenue.

4. Facteurs de vulnérabilité

N.B. Il est préférable de considérer les facteurs de vulnérabilité, qui permettront de rechercher et de définir directement les zones les plus exposées, que leurs inverses, les facteurs de protection.

4.1. Conditions géologiques au toit de la couche aquifère

Une nappe libre, recevant donc tout ou partie de son alimentation à travers sa surface libre, est a priori plus exposée qu'une nappe captive, prise dans le sens le plus général où la surface piézométrique est comprise dans une couche supérieure moins transmissive que la couche aquifère. Dans le cas général où sa surface piézométrique sera supérieure à celle d'une nappe libre la surmontant, ou au sol, une nappe captive se trouvera naturellement à l'abri de pollution des types (a), (b) et (f) et assez largement dans les cas (d) et (e). Même le type (c) s'y pratique plus difficilement en raison de la pression d'injection plus grande à imposer.

On a cependant dans certains cas pensé à "polluer volontairement" des nappes captives profondes d'eau inutilisable par leurs qualités chimiques, pour évacuer des effluents.

La protection des nappes captives sous une couverture comportant une nappe libre dont la surface piézométrique est plus haute, est moins assurée. Une pollution peut se propager au bout d'un temps plus ou moins long, à travers une couche semi-perméable.

4.2. Profondeur de la surface libre de la nappe par rapport au sol, c'est-à-dire la hauteur de la zone non saturée.

Toutes choses égales d'ailleurs, on peut admettre qu'une nappe sera d'autant plus facilement et rapidement atteinte par la pollution, que sa surface sera moins profonde : la vulnérabilité est donc fonction inverse de la profondeur.

4.3. Perméabilité verticale de la zone non saturée.

Cette zone comprend le "sol" proprement dit (couche arable) et diverses "formations superficielles" au-dessus du substratum "géologique". Il s'agit donc d'un milieu généralement très anisotrope et peu homogène selon la direction verticale. Aussi est-ce la perméabilité des couches les moins perméables qui importe ici. On peut admettre que la vulnérabilité est fonction de la perméabilité verticale. La mesure in-situ de cette perméabilité est délicate, aussi sa définition qualitative par la qualifi-

cation lithologique des couches suffirait pour établir une classification.

- 4.4. Transmissivité T de la couche aquifère -et plus particulièrement celle des couches privilégiées où les vitesses réelles d'écoulement sont les plus grandes et gradient hydraulique i . Ces paramètres règlent ensemble le débit unitaire de la nappe : plus ils sont grands, plus ce débit est important, donc plus l'évacuation de l'eau polluée sera rapide, mais plus aussi se propagera l'eau polluée dans la direction d'écoulement de la nappe.

La vulnérabilité à la pollution ponctuelle est donc fonction inverse de T et i , sauf dans les types de pollution (d) et (e), où au contraire elle facilite la propagation plus rapide de la pollution à partir d'un cours d'eau.

- 4.5. Proximité d'un cours d'eau de surface en liaison hydraulique avec la nappe ; nature et continuité de ces relations : drainage ou apport.
- 4.6. Degré de pollution actuelle permanente ou temporaire de l'eau de ce cours d'eau ; ou risque de pollution accidentelle du cours d'eau.

5. Importance relative de ces facteurs selon les types de pollution

On peut examiner deux à deux chacun des 6 facteurs de vulnérabilité en fonction des 6 types de pollution définis plus haut, sous forme d'un tableau :

Facteurs de vulnérabilité (cf. 4)	Types de pollution (cf. 2)					
	a (surface)	b (subsurface)	c (injection nappe)	d (induction)	e (cours d'eau)	f (pluie)
1. (liberté nappe)	condition nécessaire	condition nécessaire	condition non nécessaire mais favorable	cas le plus fréquent	condition nécessaire	condition nécessaire
2. (profondeur surface nappe)	incidence primordiale fonction inverse	incidence primordiale fonction inverse	sans incidence (sauf économique)	sans incidence	sans incidence	incidence primordiale fonction inverse
3. (perméabilité verticale zone non saturée)	incidence primordiale fonction directe	incidence primordiale fonction directe	sans incidence	sans incidence	sans incidence	incidence primordiale fonction directe
4. (transmissivité aquifère & gradient)	incidence sur durée persistance (3.2) fonction inverse	incidence sur durée persistance (3.2) fonction inverse	incidence sur durée persistance (3.2) fonction inverse	incidence primordiale fonction directe	incidence primordiale fonction directe	incidence sur durée persistance (3.2) fonction inverse
5. (distance à cours d'eau limite)	incidence sur trajectoire et durée d'évacuation	incidence sur trajectoire et durée d'évacuation	incidence sur trajectoire et durée d'évacuation	incidence primordiale (mer notamment)	incidence sur durée	incidence sur durée de persistance
6. (pollution du cours d'eau limite)	sans incidence	sans incidence	sans incidence	incidence directe	incidence directe	sans incidence directe

6. Possibilités d'une cartographie

On pourrait considérer les six facteurs définis plus haut comme autant de "paramètres" de la vulnérabilité, pouvant servir de base à une classification et par conséquent à une cartographie.

6.1. Les couches aquifères affleurantes comprennent généralement une nappe libre. La "première nappe" à partir du sol n'est une nappe captive que dans les régions où les roches affleurantes ne sont pas aquifères (couches sédimentaires de faible perméabilité : argiles, marnes).

A la distinction nappe libre/nappe captive, on pourrait donc substituer, comme base de cartographie, la distinction entre :

- domaines aquifères à nappe libre, où devront s'appliquer les différents critères de vulnérabilité à la pollution
- domaines dépourvus de nappe libre, où la cartographie envisagée est sans objet, et où l'on pourrait seulement indiquer l'existence connue ou probable d'une nappe captive, et une zonalité de profondeur de son toit.

6.2. La profondeur de la surface libre est une donnée accessible sans difficulté majeure. Elle est déjà connue en de nombreux domaines où la surface piézométrique a fait l'objet de relevés méthodiques. Sa représentation est possible, avec une précision variable, par courbes isobathes ; elle pourrait être simplifiée en une zonalité de profondeur moyenne admettant une certaine approximation (fonction notamment des hauteurs de fluctuation) en choisissant des classes correspondant à une vulnérabilité décroissante.

Par exemple :

- moins de 1 m
- de 1 à 5 m
- de 5 à 10 m
- de 10 à 50 m
- plus de 50 m

6.3. La perméabilité verticale de la zone non saturée surmontant la couche aquifère est beaucoup moins aisée à définir quantitativement en tous points, et il serait peu réaliste d'envisager de procéder à un très grand nombre d'essais in-situ comme préalable à une cartographie, à une échelle ne pouvant de toute façon être très grande. On devrait donc exploiter les données pédologiques et géologiques disponibles pour dresser une classification semi-qualitative de la zone non saturée selon l'ordre de perméabilité verticale des couches les moins perméables, en termes "pédo-lithologiques", mais tenant compte de la fissuration verticale possible de la roche.

Il faudrait définir une série de termes à vulnérabilité décroissante par exemple :

1. calcaires, craie ou autres roches fissurées, sans sol, ou sous sol mince et perméable,
2. sables, alluvions graveleuses, sans sol, ou sous sol mince et sableux,
3. limons de plateaux, ou alluvions limoneuses de perméabilité moyenne sur roches perméables (calcaires, craie, sables, grès, alluvions graveleuses),
4. sol ou "formations superficielles" argileuses sur roches perméables
Exemple : "argile à silex sur craie", "sidérolithique sur calcaires fissurés", "alluvions argileuses sur alluvions graveleuses".
5. roches et sol à faible perméabilité :
sol argilo-sableux sur molasse, sur craie marneuse, sur arènes ou moraines, sol argileux sur schistes altérés, etc... (domaine généralement dépourvu de nappe à surface libre).

On pourrait concevoir de traduire cartographiquement cette classification en zonalité simple, par une gamme de teinte, les plus foncées correspondant aux conditions de plus grande vulnérabilité.

Un élément d'information complémentaire utile serait sans doute l'indication des capacités de réaction du milieu vis-à-vis de certains produits polluants, pouvant dans certains cas entraîner des fixations ou des décompositions (absorptions, échanges d'ion). Mais ce problème

devrait être traité en fonction d'une gamme nombreuse de polluants, et il nécessiterait une phase de recherche plus systématique en laboratoire, avant d'envisager une cartographie.

6.4. Transmissivité des aquifères et gradient sont des paramètres relevant de la cartographie hydrogéologique proprement dite. Leur représentation directe et indépendante est malaisée et se marierait mal avec la zonalité précédente, aussi faudrait-il lui substituer une classification semi-quantitative (du type élevé-moyen-faible) des débits unitaires moyens (débit par unité de largeur perpendiculaire à la direction d'écoulement) de la nappe, plus ou moins présumés. Mais on sait que l'écart peut être grand entre les vitesses moyennes théoriques compatibles avec ces débits et les vitesses réelles de transit d'eau dans les strates ou chenaux privilégiés au sein du milieu aquifère, vitesses que mettent en évidence les traçages. En milieu peu homogène la notion de débit moyen n'a qu'une faible réalité physique.

Cette classification pourrait se traduire par un figuré superposable à la représentation par des teintes des zones de perméabilité verticale envisagée ci-dessus (6.3.). On pourrait aussi envisager une représentation directe des distances moyennes probables de parcours en une unité de temps (par exemple le jour), au moyen de flèches proportionnelles.

6.5. Le type et le sens des relations entre les cours d'eau et les nappes ne sont pas connus partout avec certitude, et en outre ils ne sont pas toujours stables. Mais leur représentation sur les cartes ne pose aucun problème. Il s'agit par définition de figurations linéaires, comprises dans le programme normal des cartes hydrogéologiques.

6.6. Enfin la classification des cours d'eau selon le degré de leur pollution a déjà été faite (cf. Atlas de la pollution des eaux * p. 125)

Aussi sa représentation sur carte ne pose-t-elle aucun problème particulier.

(*) Atlas de la pollution des eaux diffusé par le Centre français d'information de l'eau (C.E.F.I.E.) 21, rue de la Boétie - Paris 8°, et par l'Association française pour l'étude des eaux (A.F.E.E.) 25, avenue Marceau - Paris 16° - Septembre 1963

Conclusions

Une cartographie de la vulnérabilité des nappes souterraines à la pollution semble parfaitement concevable, en se basant essentiellement sur :

- une zonalité des possibilités d'infiltration (6.3) représentable par des couleurs les domaines sans nappe libre, à première nappe captive formant le cas-limite de non vulnérabilité,
- une zonalité des profondeurs (6.2) représentable par courbes,
- une zonalité des vitesses d'évacuation probables, (6.4) représentable par des figurés,
- la représentation des cours d'eau limite, classés par degré de pollution actuelle.

Il serait naturellement possible d'envisager d'introduire aussi dans ces cartes des informations sur les foyers actuels, actifs ou potentiels, de pollution des nappes souterraines, et d'y faire figurer en outre les principaux points à protéger (captages).

Au-delà de cartes juxtaposant des zonalités et ces informations de manière objective, mais mieux utilisables par des spécialistes ayant besoin d'éléments d'appréciation pour traiter des cas précis que par des personnes moins averties, il pourrait être d'une utilité plus générale de les convertir en cartes plus simples, sans doute plus subjectives et interprétées, mais ramenée à une zonalité unique des risques de pollution, éventuellement adaptée directement aux divers types de risques, (délimitation de zones où telle catégorie d'implantation industrielle serait "fortement déconseillée", ou "tolérable sous contrôle", où "possible" etc...). De telles cartes faciliteraient les études préparatoires de sites d'implantation industrielle. Elles devraient toutefois éviter de permettre des utilisations abusives et ne pas restreindre le recours au spécialiste pour les études précises indispensables.

Des expériences seraient nécessaires pour éprouver les principes énoncés ici, mettre au point les programmes et les normes de représentation, et rechercher les échelles les mieux appropriées, en traitant quelques domaines réels.

Mais le développement d'une cartographie dans ce domaine serait moins une fin qu'un moyen au service d'une politique d'ensemble de protection des eaux souterraines dont la responsabilité incombe aux Services publics.