

NATIONS UNIES

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ
GENÈVE

LES EAUX SOUTERRAINES

Gestion et protection

par

J. MARGAT et L. MONITION



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département HYDROGÉOLOGIE

B.P. 6009 – 45 Orléans (02)

Tél.: (38) 66.06.60

71 SGN 108 HYD

Janvier 1971

R E S U M E

Les eaux souterraines tiennent une place primordiale parmi les ressources utilisées pour l'alimentation humaine. Aussi leur conservation et leur protection constituent-elles un objectif essentiel des services publics responsables des problèmes d'eau dans tous les pays :

- conservation des ressources visant à satisfaire en priorité l'utilisation noble qu'est la consommation humaine
- protection de la qualité contre la pollution, tout particulièrement dans les périmètres d'appel des captages desservant des adductions d'eau potable.

Ce rappel des notions de base et des règles générales devant guider l'action publique dans ce domaine est destiné aux non spécialistes. On s'est efforcé de lui donner le caractère d'un document de vulgarisation. Il a été établi pour l'Organisation mondiale de la Santé (O.M.S.) à la demande de M. PAVANELLO, Chef du Service de la pollution du milieu, en vue de figurer dans les publications de l'O.M.S. Ce travail a été réalisé par le département d'hydrogéologie du Service géologique national.

"Les ressources en eaux douces ne sont pas inépuisables. Il est indispensable de les préserver, de les contrôler et, si possible, de les accroître".

Charte européenne de l'eau (2ème principe)

La sauvegarde de l'eau implique un effort important de recherche scientifique, de formation de spécialistes et d'information publique.

Charte européenne de l'eau (9ème principe)

AVERTISSEMENT *

Ce rapport résulte d'un montage de textes extraits de divers rapports ou notes récents (1970) du département d'hydrogéologie. Il n'a donc pas de prétention d'originalité.

L'établissement de ce document pour l'O.M.S. (à la demande verbale de M. PAVANELLO), en marge du contrat OMS/BRGM passé en 1970, (étude sur le comportement des polluants vis-à-vis de divers types de sols), entre dans le cadre du développement des interventions du B.R.G.M. auprès de cette organisation internationale.

Rappelons que le B.R.G.M. (D.R.M.E.) fournit actuellement à l'O.M.S. un hydrogéologue (M. MARTIN) pour l'opération "Alimentation en eau de Dakar" (projet PNUD). De plus, l'O.M.S. a déjà demandé au B.R.G.M. de mettre cet expert à sa disposition au terme de sa mission (fin 1971). L'O.M.S. qui ne possède aucun expert permanent en hydrogéologie, envisage en effet de s'occuper davantage des eaux souterraines, notamment dans le cadre du Service de la pollution du milieu. Le B.R.G.M. est donc bien placé pour remplir la fonction de conseil permanent de l'O.M.S. en hydrogéologie.

Le souci de développer l'action du B.R.G.M. dans le domaine de la protection des eaux souterraines, qui entre notamment dans le cadre des missions de service public du Service géologique national en France, peut être étendu au plan des interventions du B.R.G.M. à l'étranger. A cet effet ce document est mis à la disposition des services opérationnels (D.R.M.E.) à toutes fins utiles.

T A B L E

INTRODUCTION

1. LES EAUX SOUTERRAINES DANS L'ENSEMBLE DES RESSOURCES EN EAU

2. PRINCIPES DE LA GESTION DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE

- 2.1. Motivations de la gestion
- 2.2. Conséquences de ces motivations
- 2.3. Conditions de la gestion

3. VULNERABILITE DES NAPPES A LA POLLUTION-MOYENS DE PROTECTION ET DE PARADE

- 3.1. Eau "pure" ou eau de bonne qualité ?
- 3.2. Altération naturelle de la qualité des eaux souterraines
- 3.3. Pollution des eaux souterraines
- 3.4. Vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine
- 3.5. Prévention de la pollution et protection
- 3.6. Détection des pollutions et remèdes

ANNEXE: 1-Index bibliographique sur les périmètres de protection des captages d'eau d'alimentation

2-Pollution des eaux souterraines. Bibliographie sommaire (études générales)

INTRODUCTION

L'eau a été, à toutes les époques, l'objet de préoccupations diverses et de nombreux travaux ont été réalisés pour la maîtrise et l'emmagasinement des eaux superficielles ainsi que pour l'extraction de l'eau souterraine. Du fait des économies modernes en pleine mutation dans les pays en voie de développement, mutation qui a pour conséquence un développement accéléré de l'urbanisation et de l'industrie, une modernisation et une amélioration de l'agriculture, un accroissement ininterrompu des sites touristiques (création de besoins saisonniers importants) le problème de l'eau a maintenant changé de nature et d'ampleur. Il ne s'agit plus seulement de trouver de l'eau mais encore faut-il qu'elle soit de bonne qualité et en quantité suffisante pour satisfaire les besoins.

Jusqu'à une date récente, on avait tendance à considérer que seule les zones arides souffraient du manque d'eau. On s'aperçoit aujourd'hui que cette pénurie risque d'affecter les régions à fortes concentrations urbaines et industrielles des pays avancés. Le développement industriel et touristique est souvent freiné par le manque d'eau. Par ailleurs, l'opinion publique est de plus en plus sensibilisée aux effets de la pollution qui affecte de plus en plus la qualité de l'eau distribuée dans certaines agglomérations où l'on constate un accroissement de la consommation de l'eau de table en bouteilles. La dégradation des rivières et des fleuves par les rejets industriels ne fait qu'augmenter le malaise existant.

1. LES EAUX SOUTERRAINES DANS L'ENSEMBLE DES RESSOURCES EN EAU

Les ressources en eau sont extrêmement variables et inégalement réparties, alors que les besoins à satisfaire augmentent chaque jour. Les zones critiques où les demandes d'eau se manifestent avec acuité, sont de plus en plus nombreuses et s'étendent. Les périodes critiques, généralement saisonnières, ont tendance à s'étaler.

Les responsables scientifiques et techniques essaient de pallier cette carence en proposant des remèdes inégalement efficaces : diminuer les pertes par évaporation, restreindre les écoulements à la mer, freiner les gaspillages, maîtriser l'irrigation, recycler les eaux pour les faire servir plusieurs fois, lutter contre la pollution, traiter les eaux usées, dessaler l'eau de mer...

Plus généralement on se préoccupe d'utiliser au mieux les ressources et les réserves naturelles : rivières, lacs, nappes souterraines.

Les ressources naturelles en eaux douces, souterraines ou superficielles, ont une même origine : la pluie et les autres formes de précipitation, dont au cours du cycle une partie va ruisseler et gagner directement les rivières, une autre s'évaporer, une autre s'infiltrer pour parvenir jusqu'aux nappes souterraines puis rejoindre avec un certain retard les cours d'eau. Leur variabilité dépend de la pluie et de l'évapotranspiration qui est pratiquement constante en moyenne annuelle. Mais cette variabilité est atténuée par des régularisations naturelles dues à la grandeur du bassin, au stockage périodique des précipitations en altitude sous forme de neige, et surtout au stockage souterrain dans les roches aquifères qui peuvent emmagasiner de grandes quantités d'eau (globalement vingt fois plus que les lacs et rivières sur l'ensemble de la Terre) et entretenir les étiages des rivières qui leur sont subordonnées.

Il existe également des moyens de régularisation artificiels comme les barrages.

Dans cet ensemble de ressources naturelles, les nappes d'eau souterraine jouent un rôle déterminant dans une gestion rationnelle générale qui consiste à adapter l'utilisation des ressources naturelles aux besoins, existants ou prévisibles, et à répondre à des exigences de qualité.

Les eaux souterraines présentent généralement une bonne qualité à certaines exceptions près (zones côtières, contact avec des roches salifères). La filtration des eaux à travers les terrains poreux leur confère une saveur et une fraîcheur appréciables et offre une certaine garantie du point de vue bactériologique. Le débit des nappes souterraines présente une grande régularité par rapport à celui des rivières. Les réserves d'eau souterraine peuvent être importantes même si l'alimentation actuelle est faible ou nulle comme dans le cas de certaines nappes captives ("Continental intercalaire" du Sahara, grès de Nubie en Egypte, bassin du Duero en Espagne, "Sables verts" du bassin de Paris en France, etc...) qui emmagasinent des milliards de mètres cubes d'eau douce. Il n'en est pas de même pour les eaux de surface en raison de la rareté des sites de barrages, du coût élevé des aménagements et des pertes par évaporation à la surface des retenues.

Les nappes souterraines ont en général une grande extension horizontale ce qui les différencie du caractère linéaire des rivières. Elles se présentent comme un système naturel et original d'adduction qui facilite des prélèvements très dispersés. Il faut toutefois bien se garder de confondre le débit de production d'un puits ou d'un forage qui dépend des paramètres hydrauliques locaux de la roche réservoir avec le débit global de la nappe qui est fonction de son alimentation naturelle.

Il faut bien noter que les ressources en eau souterraine n'équivalent pas à l'alimentation naturelle définie à partir des calculs de bilan, sa définition est beaucoup plus complexe : c'est la quantité d'eau maximale exploitable pendant une durée déterminée, dans des conditions techniques et économiques acceptables, sans provoquer de diminution de débit exagérée et préjudiciable aux limites hydrauliques du réservoir aquifère considéré. Généralement ces limites sont constituées par les rivières ou les ruisseaux drainants, ou par des lignes de sources. Les relations entre eaux superficielles et eaux souterraines sont très étroites et il faut se garder d'additionner ces deux types de ressources, sauf dans la mesure où la fraction non consommée du débit capté dans une nappe souterraine est restituée dans le bassin du cours d'eau qui la draine. L'additivité partielle des ressources en eau de surface et en eau souterraine dépend donc de l'échelle ; elle croît avec l'étendue du bassin considéré.

A l'heure actuelle, on dispose d'outils bien adaptés pour simuler les écoulements de nappe et gérer les ressources, ce sont les modèles analogiques électriques et les modèles mathématiques. Mais leur élaboration ne peut se faire qu'à partir de données de base hydrogéologiques aboutissant à une connaissance approfondie de la structure du réservoir, des paramètres hydrauliques de l'aquifère (perméabilité et coefficient d'emmagasinement), de la répartition des niveaux piézométriques, des débits aux émergences (sources), de l'évolution dans le temps des données variables, des exploitations, etc...

Deux exemples pris en Espagne et en France permettront d'illustrer toute l'importance des eaux souterraines dans l'ensemble des ressources en eau. En Espagne l'alimentation des villes et l'industrie font appel aux eaux souterraines pour satisfaire 30 % de leurs besoins en eaux. Quant à l'irrigation, l'eau souterraine entre pour 25 % dans l'eau utilisée. En France 50 % du débit total des rivières proviennent des nappes d'eau souterraine, 25 % de la consommation en eau des industries françaises (en excluant les eaux de refroidissement) sont couverts par des exploitations d'eau souterraine, près des 2/3 des consommations d'eau potable proviennent de captages d'eau souterraine.

Ainsi les eaux souterraines ont de par leur originalité un rôle essentiel à jouer dans l'utilisation intégrée de l'ensemble des ressources en eau, aussi un effort particulier doit-il être fait pour les mieux connaître, afin de les conserver en qualité et en quantité et de gérer leur exploitation.

Il faut constater que trop souvent, dans les projets de mise en valeur des ressources hydrauliques, les eaux souterraines n'ont pu, fautes de données, être prises en considération. Ainsi, il a été omis d'envisager dans de nombreux cas la possibilité d'utiliser les eaux souterraines pour recharger les rivières asséchées (pourtant encore utilisables, à l'aval des barrages) pour l'irrigation, en particulier dans les zones irriguées où l'eau infiltrée pourrait être utilisée pour être acheminée plus loin. La qualité supérieure de l'eau souterraine pour l'alimentation humaine n'a pas été partout suffisamment jugée à sa haute valeur.

Les eaux souterraines pourraient donc, si elles étaient mieux connues, relayer en bien des cas les eaux superficielles, permettre des économies substantielles dans la réalisation des aménagements hydrauliques et surtout assurer l'alimentation humaine.

2. PRINCIPES DE LA GESTION DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE

Maîtriser les ressources en eau d'un pays consiste, essentiellement, à corriger leur irrégularité dans le temps et les inégalités de leur répartition dans l'espace présentées dans les conditions naturelles afin d'en disposer plus librement en fonction des besoins. Pour y parvenir, deux techniques différentes ont été appliquées depuis des siècles :

- l'aménagement des eaux de surface par la construction de barrages et de canaux
- l'exploitation des eaux souterraines par captages et forages.

Seule la première, qui nécessite en général de grands travaux, appelant des investissements importants, a le plus souvent fait l'objet d'entreprises publiques et de plans pré-établis, tandis que la seconde a consisté surtout en travaux ponctuels et à la portée d'investissements individuels, donc plus nombreux, mais réalisés sans plan d'ensemble.

Ces deux formes d'action sur les ressources en eau ont été conçues et conduites à des échelles différentes et le plus souvent de manière indépendante. Mais désormais, par suite de l'accroissement massif des besoins qui se rapprochent de la quantité globale des ressources, une intégration de toutes les techniques d'action devient et deviendra plus encore dans l'avenir une nécessité et aussi une possibilité.

Les aménagements hydrauliques de surface les plus faciles et les moins coûteux ont été en effet réalisés en premier ; aussi parfaire la régularisation des cours d'eau par ce moyen classique devient-il de plus en plus coûteux. Par ailleurs, les techniques d'action sur les réservoirs aquifères devenues plus efficaces et plus puissantes, peuvent désormais intervenir à une échelle plus vaste et influencer le régime des eaux de surface rendant possible des opérations planifiées et souvent nécessaire une réglementation des initiatives individuelles.

Pour parfaire la maîtrise des ressources en eau, une intégration de ces différentes techniques dans le cadre d'un bassin -ou d'un ensemble de bassins- est souhaitable.

L'emploi des capacités naturelles de stockage et d'adduction des réservoirs aquifères peut et doit être mis en compétition et parfois combiné avec la réalisation de nouvelles retenues artificielles et de systèmes de distribution. De plus, l'utilisation préférentielle et optimale des nappes souterraines prendra une valeur supplémentaire en raison de l'aggravation de la pollution des eaux de surface qui confère à la sauvegarde de la qualité des eaux une nécessité croissante.

Cette utilisation des nappes souterraines prend une dimension nouvelle qui se rapproche de celle des aménagements hydrauliques de surface et elle donne aux investigations hydrogéologiques un objectif plus large que la simple exploitation des eaux souterraines : c'est ce que l'on entend par la gestion des nappes souterraines.

L'idée moderne de gestion d'une nappe d'eau souterraine transpose au domaine des eaux souterraines celle de gestion des ressources en eau de surface d'un bassin versant équipé de barrage et de divers aménagements hydrauliques. Trouver et exploiter l'eau souterraine n'a longtemps posé que des problèmes ponctuels résolus par des techniques de prospection et de captage appropriés. Gérer une nappe pose par contre des problèmes à un niveau global, donc à une échelle différente.

Le projet de gestion d'une nappe d'eau souterraine répond à une double motivation et sa mise en oeuvre nécessite que soient remplies plusieurs conditions.

2.1. Motivations de la gestion

La conservation des ressources, demande de fixer un maximum au débit moyen global des captages à permettre dans une nappe, pour ne pas provoquer d'épuisement inacceptable des réserves à long terme, lorsque la pérennité de la production d'eau est voulue. Cette conservation s'impose notamment lorsque la progression des captages individuels dans une nappe rend leur effet global sensible aux limites et surtout aggrave leurs interférences mutuelles, de telle sorte que les nouveaux captages affaiblissent le rendement des anciens et créent des préjudices : conserver les ressources se ramène alors à conserver les productivités, ce qui impose une réglementation.

L'optimisation du dispositif et du régime des exploitations, consiste à choisir et à réaliser ceux satisfaisant le mieux et au moindre coût les besoins en eau, en quantité et en qualité. Il va de soi que cette optimisation est d'autant plus aisée que les besoins sont flexibles et peuvent eux-mêmes se plier plus ou moins aux contraintes physiques imposées aux exploitations (dans l'espace et dans le temps) ; c'est souvent le cas des besoins prévisionnels. Aussi cette optimisation est plus spécialement un objectif de planification.

Cette optimisation ne doit pas en général écarter la confrontation entre le recours à des eaux souterraines ou à des eaux de surface pour satisfaire une demande définie. Plus généralement elle peut conduire à la recherche d'une gestion intégrée des eaux de surface et des eaux souterraines.

2.2. Conséquences de ces motivations

2.2.1. Définition des ressources réelles en eau souterraine

La définition même des ressources en eau souterraine est inséparable du souci de gestion et ne saurait donc être réduite à celle

purement physique de débit naturel des nappes souterraines. Les ressources en eau souterraine constituent la fraction des ressources en eau totales que l'on a avantage à tirer directement des réservoirs aquifères, cet avantage devant s'évaluer en terme de coût, mais devant aussi tenir compte de la qualité de l'eau et d'autres critères (sécurité, etc...), y compris de la proportion restituée pouvant satisfaire dans le même bassin des besoins en aval, moins exigeants en qualité.

Les avantages présentés par les eaux souterraines sur les eaux de surface sont bien connus. Ils sont de trois ordres :

- extension plus grande, opposée au caractère linéaire des cours d'eau d'où une proximité des lieux d'utilisation restreignant les travaux d'adduction, d'autant plus avantageuse pour les utilisations dispersées
- régularité plus grande des débits et réserves naturelles, évitant le recours à des travaux de régularisation
- qualité plus constante et généralement mieux protégée contre les risques de pollution, liée notamment à une situation "en amont" par rapport aux eaux de surface (du moins dans le cas général, car il y a des exceptions).

Les capacités de stockage et de filtration des réservoirs aquifères peuvent de plus se prêter dans certains cas à la régularisation ou à l'amélioration de qualité des eaux de surface (alimentation artificielle des nappes).

Si l'on confronte les ressources en eau souterraine ainsi définies au débit moyen naturel global des nappes (dénommées parfois "ressources potentielles") on voit que les ressources réelles - ou "exploitables" - peuvent être inférieures, égales ou supérieures à ce débit moyen des nappes.

Les ressources réelles sont le plus souvent inférieures au débit moyen naturel global des nappes, sous l'effet de divers facteurs limitant :

- contraintes techniques limitant les possibilités pratiques (et économiques) d'exploitation ; par exemple une qualité médiocre de la roche aquifère, ou une trop faible épaisseur du réservoir, entraînant une trop faible productivité unitaire des ouvrages, ou encore une trop grande profondeur du niveau de la nappe (certains réservoirs karstiques par exemple).

Dans certains cas, bien que le débit global des nappes puisse être important et entretenir un débit de base élevé des cours d'eau, une fraction seulement, parfois minime, est exploitable en pratique et constitue une ressource réelle.

- capacité régulatrice insuffisante (faible réserve) empêchant, même en l'absence des contraintes précédentes, d'élever le débit global d'exploitation au niveau du débit naturel moyen de la nappe et d'autant moins que le régime de son alimentation est plus irrégulier.

La ressource exploitable peut dans ce cas être peu supérieure au débit minimal de la nappe.

- contraintes extérieures aux limites des nappes à exploiter : débits d'étiage de rivière, ou de source, à conserver ; niveau à maintenir (par exemple en bordure de la mer).

Les ressources réelles ne peuvent être voisines du débit moyen global naturel des nappes qu'en l'absence de tous ces facteurs limitant, ce qui est rare. Le plus souvent, par le jeu combiné de ces divers facteurs, les ressources réelles sont de l'ordre de $1/3$ à $1/2$ du débit moyen naturel des nappes souterraines.

Enfin, les ressources réelles peuvent être supérieures au débit global naturel d'une nappe si l'exploitation a un effet indirect d'accroissement de l'alimentation (cas général des captages de nappes alluviales en

liaison hydraulique avec des rivières permanentes) ou si une alimentation artificielle est directement opérée, ou encore si la conservation de la réserve n'est pas imposée à long terme. Mais dans le premier cas cela revient à transférer en ressources en eau souterraine une fraction des eaux de surface, et dans le second cas, il faut bien noter que les ressources offertes ne sont pas permanentes (cf. infra).

2.2.2. Conservation des ressources et utilisation des réserves

La gestion d'une nappe souterraine implique en effet un choix préalable entre une politique de conservation des réserves à plus ou moins long terme, et un épuisement contrôlé ("mining"). Le deuxième cas est en général physiquement imposé par l'exploitation des nappes captives, dont le débit naturel est d'ailleurs très faible, bien inférieur à celui des nappes libres drainées par les rivières. Mais des exploitations de réserve à moyen terme ne sont pas à exclure, même dans le cas de nappes libres si elles n'entraînent pas de préjudices non tolérés, pour satisfaire des besoins temporaires.

Enfin la conservation des ressources ne doit pas toujours s'assimiler à la conservation des réserves : la mise en action de dispositifs d'exploitation intensive entraîne toujours une réduction partielle définitive de la réserve d'une nappe par les rabattements locaux qu'elle détermine, et une telle réduction peut dans certains cas être sans inconvénient, voire bénéfique (accroissement d'alimentation aux limites, ou diminution de pertes par évaporation). Néanmoins dans la perspective d'une exploitation en équilibre (c'est-à-dire de conservation des ressources) il faut conserver une réserve suffisante pour sauvegarder la capacité régulatrice de la nappe, et d'autant plus que le régime de son alimentation naturelle est irrégulier.

L'utilisation des réserves des nappes souterraines présente ainsi un double aspect :

- les réserves remplissent la fonction de stock permettant de régler plus ou moins librement le régime d'exploitation par rapport aux variations de l'alimentation naturelle, y compris au niveau interannuel : cette capacité régulatrice permet de rapprocher les ressources réellement exploitables du débit moyen naturel des nappes, mais c'est seulement en ce sens que le recours aux réserves contribue à déterminer les ressources
- l'exploitation des réserves sans souci de maintien d'équilibre à long terme (épuisement) procure des ressources temporaires.

Ces deux aspects ne se distinguent en fait que par des échelles de temps différentes. On voit qu'en aucun cas l'utilisation des réserves ne peut fournir de ressources permanentes indépendantes de celles procurées par le captage du débit des nappes.

2.2.3. Gestion intégrée des eaux souterraines et des eaux de surface

L'idée de gestion intégrée ne se réduit pas à subordonner à un niveau de décision commun les équipements et le contrôle des exploitations d'eau de surface et d'eau souterraine dans un domaine défini -en général un bassin- en se basant surtout sur des considérations économiques, bien que cette coordination soit par elle-même déjà souhaitable. Sur le plan technique la gestion intégrée, consiste aussi à utiliser en commun les potentialités d'accumulation de surface et de stockage souterrain, ainsi que les conditions naturelles d'écoulement de surface et souterrain. Les modalités de relations entre les nappes souterraines et les cours d'eau de surface ainsi que les possibilités pratiques d'agir sur elles jouent ici un rôle primordial.

Deux types d'opération peuvent s'envisager, séparément ou à la fois :

- L'alimentation artificielle des nappes souterraines consiste à détourner à leur profit une partie des eaux de surface :
 - . soit pour accroître les possibilités d'exploitation d'eau directement dans les réservoirs aquifères, en utilisant plus ou moins leur capacité de stockage, et souvent aussi -comme c'est le cas le plus fréquent actuellement- leur capacité d'épuration naturelle
 - . soit pour obtenir un retour différé et étalé aux cours d'eau, c'est-à-dire une régularisation analogue à celle assurée par un barrage d'accumulation.
- L'exploitation régulatrice des nappes souterraines consiste au contraire à accroître artificiellement l'apport naturel des nappes aux cours d'eau par une exploitation de celles-ci au profit de ceux-là notamment en étiage, de telle sorte que l'effet aux limites des prélèvements dans les réservoirs aquifères soit suffisamment différé ou étalé.

Ces deux sortes d'opération sont complémentaires et reviennent à utiliser la capacité régulatrice des réservoirs aquifères en accroissant temporairement la réserve dans le premier cas, en la diminuant dans le second, et en jouant dans les deux cas sur la possibilité d'agir sur les nappes souterraines sans effet immédiat sur les cours d'eau qui les limitent.

2.3. Conditions de la gestion

La gestion d'une nappe souterraine implique en premier lieu l'existence d'une autorité dotée de pouvoir de décision ou de contrôle sur l'ensemble des actions relatives au réservoir aquifère concerné -ou au bassin, s'il s'agit d'une gestion intégrée avec celle des eaux de surface-.

Cette autorité doit disposer d'informations :

- Informations physiques sur le réservoir aquifère : conditions hydrogéologiques, dynamique de la nappe, relations avec les eaux de surface :

Ces informations doivent être suffisantes pour permettre de comparer les effets prévisibles -notamment au moyen de simulations- de différentes modalités d'exploitation (dispositif, régime), afin de choisir celles conciliant le mieux la satisfaction des demandes et le respect des contraintes imposées.

- Informations sur les contraintes techniques et économiques :
 - . conservation -permanente ou temporaire- de débits minimaux aux limites (étiage de cours d'eau, sources captées)
 - . conservation de niveau en certains secteurs (champ de captage pré-existant, risque de "remontée" de nappe)
 - . coûts de production unitaire, fonction eux-mêmes de nombreux facteurs économiques et techniques, et aussi des caractéristiques physiques de l'aquifère limitant la productivité des captages.
- Informations sur la demande (pour mémoire) :
 - quantité, qualité, localisation, variabilité ; degré de flexibilité et risques de défaillances ; partage entre consommation effective et rejet.

Enfin cette autorité doit disposer de moyens théoriques et pratiques d'exploiter ces informations pour les traduire en décisions de gestion.

Bases théoriques

Les principes de gestion des eaux de surface d'un bassin versant au moyen d'un barrage d'accumulation ne peuvent être transposés tels quels à la gestion d'une nappe souterraine. Dans un bassin versant le barrage maîtrise -plus ou moins complètement- le débit et on agit essentiellement

sur le réservoir sans modifier les conditions de l'écoulement dans le bassin amont pour régler le débit fourni à l'aval.

Dans une nappe souterraine les fonctions d'adduction et de réservoir sont confondues. De plus un milieu aquifère est le siège non seulement d'écoulement souterrain mais aussi de propagation d'influence. Aussi la gestion d'une nappe ne peut se concevoir seulement en terme de débits, mais aussi d'influence sur les niveaux. Prélever de l'eau souterraine ne se réduit pas à soustraire un débit : le prélèvement impose un rabattement du niveau exerçant une influence sur l'ensemble de la nappe, cette influence étant naturellement fonction de la distance (et du temps pendant une phase transitoire de rééquilibre) et aussi des propriétés physiques des roches aquifères, par conséquent de leur distribution dans l'espace et de la configuration du réservoir. C'est la propagation de cette influence jusqu'aux limites d'une nappe qui agit indirectement sur les débits entrant ou sortant à ces limites (y compris par la surface de la nappe).

La position des ouvrages d'exploitation et le régime de prélèvement imposés ne sont donc pas indifférents : pour une même exploitation globale d'une nappe projetée, des effets aux limites très différents sont possibles en fonction des dispositifs et des régimes. Inversement donc les ressources exploitables en pratique ne sont pas indépendantes du dispositif et du régime à adopter.

Par exemple, si les captages sont proches d'une limite d'émergence d'une nappe (sources, rivière drainante) leur effet sur ces émergences sera ample et rapide, mais l'action sur le réservoir sera réduite et la capacité régulatrice peu ou non utilisée. Au contraire des captages éloignés de toute limite exerceront sur elles un effet très modulé dans le temps et utiliseront au mieux la capacité régulatrice du réservoir, mais sans pouvoir agir sélectivement sur certaines conditions aux limites (localement ou périodiquement). Les mêmes principes sont applicables aux actions de recharge.

La gestion d'une nappe suppose donc une stratégie et ne peut se ramener à l'établissement pur et simple d'un bilan global prévisionnel. Cette stratégie nécessite un modèle hydrodynamique correct de chaque nappe et aussi naturellement un modèle économique.

Conclusions

La gestion des nappes souterraines doit être guidée principalement par les soucis ou les principes suivants :

- Ne pas minimiser ou négliger les possibilités de recours aux eaux souterraines lorsqu'il peut être avantageux ou du moins compétitif par rapport au recours aux eaux de surface pour satisfaire des demandes d'eau déterminées.
- Accorder une priorité aux eaux souterraines pour satisfaire les besoins "nobles", auxquels il convient de réserver l'eau à utiliser pour la première fois, à commencer naturellement par l'alimentation humaine. Cette priorité doit s'étendre à des besoins futurs, dans le cadre d'une prospective générale d'utilisation des ressources en eau d'un pays, ce qui pourrait impliquer la délimitation de "réserves naturelles" à conserver.
- Ne pas mettre seulement les eaux souterraines en compétition avec les eaux de surface, mais penser aussi à leur utilisation combinée, notamment par les techniques d'alimentation artificielle, et plus généralement en tenant compte des restitutions d'eau après un premier usage, qui transforment en ressources d'eau de surface (à qualité plus ou moins dégradée, mais aussi relativement régularisée) une partie des eaux souterraines captées.
- Protéger la qualité des eaux souterraines par des mesures de prévention de la pollution, surtout chimique, et par un contrôle approprié.

3. VULNERABILITE DES NAPPES A LA POLLUTION-MOYENS DE PROTECTION ET DE PARADE

Les déclarations des responsables gouvernementaux, les conférences prononcées par des scientifiques compétents, les articles de presse et les émissions de radio-télévision relatant des cas journaliers de pollutions, la multiplicité des colloques et réunions où se trouvent rassemblés les techniciens aux prises avec les problèmes que posent les rejets de déchets de toute origine, ont mis suffisamment l'accent sur les causes de la pollution et la nécessité de trouver des remèdes efficaces pour le traitement des eaux polluées. Pour ce qui est de la protection des eaux souterraines, les hydrogéologues sont bien conscients de leurs responsabilités et sont prêts à proposer des mesures de prévention et de lutte pour la conservation de la qualité de ces eaux qui doivent être réservées à un usage noble, celui de l'alimentation humaine.

Qu'est-ce qu'une eau de bonne qualité ? Où se trouve-t-elle ? Quels sont les causes et les types de pollution les plus fréquents ? Quels sont les critères de vulnérabilité d'une nappe à la pollution ? Quels sont les moyens de prévention ? Comment définir un périmètre de protection ? Existe-t-il des moyens de parade lorsque la pollution est effective ?

C'est à ces questions que l'on s'est efforcé de répondre dans ce document.

3.1. Eau "pure" ou eau de bonne qualité ?

Les eaux souterraines ne sont pas chimiquement pures : elles contiennent toujours une certaine quantité de sels dissous qui leur confèrent une certaine saveur nécessaire et acceptable jusqu'à un seuil de potabilité variable suivant les goûts et les normes établis par les responsables de la santé publique. En entendant par "eau pure", comme cela se fait couramment, une eau naturellement dépourvue d'impuretés, une eau non polluée, on risque d'introduire une confusion car des eaux naturelles peuvent être impropres, par leur composition chimique, à la consommation, bien que "pures" dans ce sens. Plutôt que d'"eau pure", il serait donc préférable de parler d'eau de bonne qualité, en fonction de l'usage auquel on la destine : alimentation urbaine, industrie, irrigation.

Lorsqu'il s'agit d'eau de consommation humaine, l'eau de bonne qualité doit être exempte de bactéries pathogènes et d'agents de pollution nocifs pour l'organisme. Cette eau doit de plus être "douce", c'est-à-dire que la concentration en sels dissous ne doit pas dépasser les limites de tolérance fixées par le pays considéré. Une concentration de 0,5 g correspond généralement à la limite supérieure d'une eau douce, mais dans les zones arides des eaux plus chargées peuvent être admises et supportées (2 g/l).*

Il faut de plus prendre en considération les éléments traces, surtout ceux qui sont caractéristiques des pollutions chimiques. La qualité bactériologique est une donnée préalable à toute distribution et la surveillance régulière, une nécessité absolue qui est généralement imposée par la loi.

Le concept d'eau de bonne qualité et d'eau douce est donc très relatif. Quoiqu'il en soit les eaux de bonne qualité méritent une attention particulière, elles doivent être recensées et protégées pour être réservées à une utilisation noble ; leur degré de vulnérabilité aux pollutions, notamment chimiques, doit être précisé afin que puissent être implantés en connaissance de cause les nouveaux centres industriels et qu'éventuellement des mesures de parade puissent être prises.

Il existe dans chaque pays des réserves d'eau de bonne qualité qu'il importe de sauvegarder et qui doivent faire l'objet de mesures particulières de protection sur un plan plus large que les périmètres réglementaires concernant seulement les captages pour la consommation humaine. Ces réserves doivent être considérées de la même manière que les réserves naturelles de flore et de faune (parcs nationaux).

* dans les pays arides une eau trop douce présente même des inconvénients pour la consommation humaine.

La détermination de telles réserves impliquent la prise en considération de deux critères principaux :

- la bonne qualité naturelle (chimique ou biologique) actuelle des eaux, ce qui implique l'absence de foyers de pollution
- la facilité d'assurer la conservation de cette qualité soit que les conditions géologiques naturelles rendent les eaux peu ou non vulnérables à la pollution, soit qu'elles permettent de définir aisément des mesures de protection applicables en pratique sans grande difficulté.

C'est sur ces bases qu'un recensement des réserves d'eau de bonne qualité d'un territoire doit être entrepris et peut être visualisé sous forme cartographique, en vue de permettre le choix de zones à conserver et protéger.

Ainsi, il est possible de distinguer dans une première phase :

- les principales nappes d'eau souterraine douce captive, en mettant en évidence leurs zones d'alimentation
- les zones amont d'écoulement souterrain (nappes libres) et superficiel, notamment celles fournissant des débits assez importants par unité de surface, en attachant une importance particulière au domaine montagneux de haute altitude (par exemple au-dessus de 2 000 m) et aux glaciers et névés qu'il peut inclure.

3.2. Altération naturelle de la qualité des eaux souterraines. Facteurs de salinité

Des eaux souterraines peuvent être de mauvaise qualité naturelle, indépendamment de toute pollution. La qualité médiocre de ces eaux ne peut être que mise en évidence et expliquée. Elle est rarement modifiable dans le sens d'une amélioration. L'usage de telles eaux, qui heureusement ne sont pas les plus répandues en général, est forcément limité.

Il s'agit en fait d'eaux naturellement salées dans des conditions géologiques et climatiques particulières. On conviendra de donner le nom d'eau saumâtre aux eaux en teneur en sels dissous comprises entre celles des eaux douces et celles de l'eau de mer soit entre 0,5 et 30 g/l ; on emploie aussi l'expression eau salée pour les teneurs les plus voisines de celles de l'eau de mer.

Il existe dans les grands bassins sédimentaires des nappes profondes qui sont de plus en plus connues grâce aux forages de prospection pétrolière et dont les eaux connées ou fossiles sont très salées. Certaines eaux minérales ou thermo-minérales qui sont d'ailleurs pour certaines d'entre elles des émergences, naturelles ou artificielles des nappes profondes, présentent des salures très élevées.

L'existence d'eaux saumâtres, souterraines ou superficielles, est due à divers facteurs naturels ou humains, parmi lesquels les roches salifères ne sont pas un facteur aussi déterminant qu'on le considère généralement.

Toutes les roches ou sols contiennent en des proportions naturellement très diverses, des minéraux ou des substances plus ou moins solubles, lessivables. La concentration des eaux en sels dissous est, en dernière analyse, fonction surtout des conditions d'écoulement, c'est-à-dire de facteurs climatiques, morphologiques et hydrogéologiques.

Tout ce qui défavorise et ralentit le drainage naturel, en surface ou dans le sous-sol (et a fortiori dans les deux à la fois) est un facteur de concentration des eaux : les faibles pentes et les basses altitudes, les déficits d'écoulements élevés dus principalement à l'évapotranspiration, les faibles perméabilités.

Ces facteurs naturels peuvent eux-mêmes être modifiés par l'intervention humaine, consciente ou non, qui peut agir dans le sens d'une péjoration favorisant le développement et l'extension des eaux saumâtres

(on rejoint alors l'une des causes de la pollution des eaux) ou au contraire dans le sens d'une amélioration (dessalement in situ).

— L'importance du facteur climatique est attestée par la grande extension des eaux saumâtres dans les régions arides, telles que l'Afrique du Nord et les régions sahariennes, où la fréquence des roches salifères n'est pas, en moyenne, plus élevée qu'en des pays à climat tempéré (exception faite pour les dépôts salifères actuels dus précisément au processus de salification des eaux de sub-surface et des sols, par suite de l'énorme déficit des précipitations par rapport à l'évapotranspiration potentielle).

Primordial dans les pays à climat aride, ce facteur ne joue naturellement qu'un rôle secondaire dans les pays de la zone tempérée soumis à un climat humide dans l'ensemble. Il n'est cependant pas entièrement négligeable dans une partie des régions du littoral méditerranéen, lorsqu'il s'y ajoute -au moins saisonnièrement- d'autres facteurs (morphologie, proximité de la mer).

— Les facteurs géographiques sont l'une des principales causes de l'existence de nappes d'eau saumâtre.

La proximité de la mer est naturellement un facteur primordial, mais il intervient différemment selon qu'il se combine à des facteurs morphologiques ou à des facteurs géologiques.

Dans le premier cas, il s'agit des basses plaines côtières dont la très faible altitude, jointe à la nature souvent très peu perméable des sols, rend le drainage naturel (superficiel ou souterrain) très difficile. A la limite, ce drainage est impossible dans les plaines déprimées au-dessous du niveau de la mer (Flandres). L'eau des nappes phréatiques de ces plaines, généralement à très faible profondeur, est plus ou moins saumâtre, quelles que soient les conditions hydrogéologiques plus profondes : ces nappes d'eau saumâtre peuvent parfois surmonter des nappes d'eau douce plus profondes.

Dans le second cas, il s'agit de l'"invasion" d'eau de mer en profondeur sous une nappe d'eau douce, selon le schéma bien connu, l'équilibre dynamique entre les eaux douces et salées étant fonction de la charge de la nappe d'eau douce et de la perméabilité des couches aquifères sous le littoral, et le jeu des marées intervenant en outre en accroissant la hauteur de la zone de diffusion. Selon la structure hydrogéologique et la perméabilité des roches des zones côtières, la pénétration d'un "biseau" d'eau salée est plus ou moins grande : elle est facilitée dans les massifs calcaires côtiers, souvent karstiques, dans lesquels la charge d'eau douce peut être très faible (calanques entre Marseille et Cassis, région de Nice-Menton,, dans le Calvados, côte méditerranéenne grecque, yougoslave, libanaise) et dans les sables (dunes).

Mais il est fort peu de cas où cette pénétration dépasse quelques centaines de mètres ou l'ordre du kilomètre, du moins dans les couches aquifères économiquement accessibles. C'est surtout lorsque les facteurs géologiques et morphologiques se conjuguent que la zone d'invasion marine peut être plus large, notamment dans le sous-sol de certaines basses plaines côtières à couches aquifères dont les nappes n'ont qu'une faible charge : c'est le cas des deltas du littoral méditerranéen, notamment de la Camargue, certaines basses vallées et d'une partie des nappes des basses plaines littorales de l'Atlantique, etc...

Les estuaires de la côte atlantique favorisent par contre la pénétration du "biseau salé" plus avant dans le continent, à la manière de golfes profonds.

Parmi les facteurs géographiques, il faut noter aussi, bien entendu, l'influence marine qui se fait sentir dans les fleuves à estuaires comme la Seine et la Garonne.

— Les facteurs géologiques, d'une manière plus générale, agissent en tant que tels essentiellement par la lithologie, mais selon deux aspects : la teneur en sels solubles et la perméabilité des roches.

Certaines roches, dites "évaporites" sont particulièrement riches en sels solubles, et parfois, en sont entièrement constituées (sel gemme, gypse). Elles sont surtout un facteur de salure des eaux de ruissellement par

leurs affleurements, qui lorsqu'ils sont assez étendus peuvent rendre saumâtres les eaux de certaines rivières en période d'étiage : mais cela n'est sensible que pour des bassins versants assez petits.

La faible perméabilité des roches salifères ou gypsifères rend généralement les couches qui en sont constituées dépourvues de nappes exploitables. Mais dans certains cas, le contact entre ces couches et des couches plus aquifères peut contaminer des nappes à débit utilisable.

En général, c'est au Trias qu'appartiennent la plupart des couches génératrices de salures d'eaux de surface ou souterraine, par la fréquence des niveaux d'anhydrite et de sel gemme qu'elles renferment.

Quant aux eaux saumâtres, ou même sursalées, que renferment maintes couches sédimentaires profondes non salifères - d'ailleurs sans intérêt économique, hormis leur température - il s'agit le plus souvent d'eaux connées ou fossiles incomplètement diluées par le lent renouvellement d'eau de ces nappes au cours des temps géologiques. Leur salure est résiduelle et non l'effet d'un apport actuel ou récent d'eaux salées marines, comme on a cru parfois pouvoir le considérer. C'est très probablement le cas, notamment, pour les eaux légèrement saumâtres que renferment les sables albiens dans le nord du Bassin de Paris (plus de 1 g/l et jusqu'à 8 g/l sous le bassin de la Somme), ou certaines couches aquifères profondes du bassin d'Aquitaine.

Au fur et à mesure de la progression des techniques et de l'extension des analyses à de nouveaux éléments, on note dans les eaux la présence d'éléments qui, au-delà de 1 mg/l, ne sont pas tolérables par l'organisme. C'est le cas du fluor venant de l'apatite $[(\text{PO}_4)_2 \text{Ca}_3 + \text{CaF}]$ que l'on rencontre fréquemment dans les roches phosphatées, d'âge Eocène principalement, par exemple au Maroc et en France, et dans certaines roches volcaniques, comme au Mexique.

La présence de sels de fer et de manganèse provenant de l'oxydation de sulfures se rencontrent assez souvent dans les nappes phréatiques.

Enfin, il convient de rappeler que suivant un processus complexe la composition chimique de l'eau souterraine varie tout au long du circuit souterrain. C'est ainsi que les concentrations augmentent de l'amont à l'aval hydraulique d'une nappe et qu'en règle générale le faciès ultime de l'eau est chloruré sodique, tandis que des échanges de base se produisent au contact des couches argileuses rencontrées. L'eau des nappes se concentre également sous l'effet de la température extérieure, dans les zones arides, lorsque leur surface est à une profondeur relativement faible, généralement inférieure à 5 m.

3.3. Pollution des eaux souterraines

On entend par pollution toute péjoration de la qualité d'une eau résultant de l'activité humaine.

L'homme intervient de diverses manières comme facteur de pollutions et les exemples de ses méfaits sont nombreux. Il faut signaler tout d'abord des causes anthropiques directes sans interventions de l'industrie, ensuite les rejets d'eaux résiduaire : effluents urbains, industriels et agricoles. Plus extensives sont les pollutions engendrées par l'emploi généralisé de certains engrais et des "pesticides" par l'agriculture moderne. Enfin les risques de pollution radioactive que constituent les centrales atomiques et les engins destructeurs, disséminés sur la planète, ne peuvent malheureusement pas être ignorés.

La "pollution thermique" produite par les industries qui se contentent d'utiliser l'eau pour le refroidissement, est également à citer, mais n'appelle pas ici un développement spécial, car elle affecte surtout certains cours d'eau de surface.

Dans les zones littorales, l'exploitation des nappes phréatiques d'eau douce s'accompagne nécessairement de rabattement des niveaux perturbant l'équilibre entre l'eau continentale et l'eau marine et pouvant provoquer une évolution très difficilement réversible (cela exige la mise en oeuvre de moyens coûteux pour refouler l'invasion marine). L'effet peut se limiter d'abord à la zone d'influence d'un captage (remontée d'eau salée), mais il peut se généraliser (avancée du "front" des eaux salées vers l'intérieur).

A la limite, il peut s'ensuivre la disparition totale de la nappe d'eau douce utilisable, remplacée par une frange d'eau saumâtre : cela est déjà arrivé dans plusieurs pays, notamment sur certaines côtes d'Afrique du Nord à nappes phréatiques fortement sollicitées pour irriguer des cultures maraîchères. On connaît bien aussi le cas de la ville de Barcelone au sous-sol en partie envahi par l'eau de mer par suite d'un captage surexploitant.

Dans l'agriculture, la pratique d'une irrigation sans drainage efficace, parfois l'aspersion, amène sur les terres une eau qui ne circulant pas, apporte une quantité de sel qui peut à la longue augmenter et dont le lessivage à la faveur de fortes précipitations ou d'apports d'eau nouvelle constituera une cause de formation d'eau saumâtre.

Il faut encore citer l'effet des marais salants artificiels qui peuvent renforcer localement en certaines basses plaines côtières, les conditions déjà naturellement favorables à la formation d'eaux saumâtres (en basse Camargue par exemple).

Les rejets urbains industriels et agricoles qu'ils soient liquides, gazeux ou particuliers, finissent dans la plupart des cas par rejoindre les nappes souterraines. En particulier, les nappes alluviales très sollicitées pour l'alimentation en eau des villes et villages situés dans la majorité des cas le long des grands axes que constituent les rivières, sont très sensibles à toute pollution des cours d'eau. L'utilisation de puits perdus, de champs d'épandages, les dépôts d'ordures, les cimetières, les rejets industriels très diversifiés, l'usage des engrais et des pesticides, constituent autant de sources de pollutions pour les eaux souterraines.

Les accidents nucléaires provenant des différentes explosions expérimentales entraînant la dispersion d'agents agressifs radioactifs, des émissions de déchets provenant des piles atomiques, la rupture de caissons enterrés ou immergés, doivent être considérés comme de nouvelles causes de pollutions.

La transmission aux eaux souterraines est réalisée par les pluies et les rivières. Sa rapidité est fonction de nombreux facteurs en particulier de la profondeur des nappes, de la nature du sol et des roches réservoirs, notamment des propriétés qui commandent l'écoulement des eaux souterraines, et des liaisons plus ou moins directes établies entre les eaux de surface et les nappes souterraines.

3.4. Vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine

Devant les nombreuses menaces de pollution, causées surtout par le développement industriel, il revenait à l'hydrogéologue de mettre en garde les responsables de l'administration et de l'industrie contre la pollution des nappes qui restent dans la majorité des cas l'unique ressource d'eau de qualité à réserver pour des usages nobles (en priorité pour la consommation humaine) et de leur fournir des éléments d'appréciation.

Dans ce but, différents degrés de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine ont été définis et une méthode de cartographie spécialisée a été mise au point pour indiquer leur distribution géographique. Le but de telles cartes est de montrer quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface et plus précisément suivant les réservoirs contenant la première nappe d'eau souterraine (généralement libre), les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains, c'est-à-dire la vulnérabilité de ces nappes que la plupart des puits et forages exploitent pour l'alimentation humaine.

Cette vulnérabilité à la pollution doit être considérée sous trois aspects :

- L'introduction de polluants dans les nappes phréatiques, c'est-à-dire le transit, suivant un trajet vertical, de corps polluants entraînés par les eaux d'infiltration ou de fluides polluants, depuis la surface du sol jusqu'à la nappe souterraine, à travers le sol et des roches non saturées d'eau.
- La propagation de la pollution, c'est-à-dire le déplacement de l'eau ainsi polluée, entraînée par l'écoulement de la nappe ; elle peut être plus ou moins rapide selon les caractéristiques hydrauliques du réservoir et la pente de la nappe. Son extension à partir du foyer contaminant est plus ou moins grande suivant les conditions de drainage de la nappe et aussi selon la nature du polluant, fixable dans certains cas par le terrain.

- La persistance plus ou moins prolongée après la suppression du foyer de pollution ; cette durée de séjour étant fonction du renouvellement naturel de l'eau dans l'aquifère et également de la nature du polluant.

Sur ces bases, une méthodologie cartographique a été établie en ne faisant pas intervenir, dans un premier stade, la nature du polluant. Les documents doivent être élaborés d'une façon claire et immédiatement compréhensible par l'utilisateur non spécialiste.

Une cartographie déjà réalisée en France à différentes échelles, du 1/50 000 au 1/1 000 000, et qui s'est révélée suffisamment expressive à l'usage, a distingué six classes de terrains.

Les critères pris en considération sont la nature lithologique du sous-sol (du double point de vue de la facilité d'infiltration plus ou moins rapide jusqu'aux nappes, et de l'écoulement souterrain plus ou moins rapide de celles-ci), la profondeur de la surface des nappes libres à partir du sol, les modalités de drainage ou d'alimentation des nappes par les cours d'eau, la densité du réseau hydrographique permanent constituant généralement des limites de système aquifère. Il a été admis que les nappes captives dans des couches aquifères profondes recouvertes par des couches de terrains de faible perméabilité constituant des barrières étanches, sont naturellement protégées contre les pollutions d'origine superficielle.

Les cartes conçues sur ces bases constituent des documents fort appréciés par les planificateurs, les hygiénistes, les spécialistes chargés de formuler et d'appliquer la réglementation officielle en matière de protection et de conservation des eaux.

3.5. Prévention de la pollution et protection

La carte de vulnérabilité des nappes à la pollution est le document de base qui permet valablement une définition des moyens de prévention

à mettre en oeuvre et qui, en premier lieu, fournit au planificateur les éléments nécessaires pour les nouvelles implantations urbaines et industrielles et à l'hygiéniste les données pour l'établissement des projets de captage, de création de dépôts d'ordures et de cimetières. Enfin, le législateur y trouve des informations pour prendre ou renforcer des mesures de conservation et de protection des eaux souterraines.

Il existe dans la plupart des pays des lois qui régissent la protection des captages d'eau destinée à l'alimentation humaine et définissent les conditions d'installation des dépôts d'ordures et des cimetières et de rejets urbains et industriels. La loi est généralement moins précise quand il s'agit de puits perdus ou de gravières-sablières ; ces dernières deviennent rapidement après exploitation des dépôts d'immondices qui sont alors des sources de pollutions, dangereuses pour les nappes alluviales.

... Pouvoir épurateur des sols

Les sols constituent le plus souvent, à moins qu'il s'agisse de roches grossières ou fissurées, un système efficace de purification bactérienne qui n'exclut pas toutefois le recours à la chloration ou l'ozonisation de l'eau de distribution. C'est avec cet unique objectif qu'ont été définis, jusqu'à une date récente, les périmètres de protection.

Ce type d'épuration est effectivement pratiqué pour les eaux du Rhin qui, après passage sur des sables dunaires, sont distribuées à Amsterdam, la Haye et Leyde (Pays-Bas).

Dans le cas de pollutions chimiques, le comportement est, pour un même terrain, différent pour chaque type de polluant et au cours de la traversée du milieu non saturé et dans la nappe en mouvement, différentes fixations pourront se produire éliminant ainsi certains ions nocifs.

En dehors des pollutions spécifiques relatives à des industries bien connues, en nombre limité et les pollutions les plus généralisées, sont provoquées par les hydrocarbures (rupture de conduites et fuites de réservoirs), les détergents dont l'emploi domestique est généralisé, les engrais et les pesticides utilisés sur de vastes étendues par les agriculteurs. Les hydrocarbures parviennent jusqu'aux nappes et leur mode d'écoulement est plus lent ; ils peuvent au moment des baisses saisonnières de la nappe rester "suspendus" et reprendre leur cheminement à la remontée suivante de la nappe.

Les détergents du type alkyl benzène sulfonate (A.B.S.) le plus fréquent, sont des vecteurs de pollutions virales et causent des pertes de charge appréciables dans les filtres à sables. Leur présence a été constatée à 30 m de profondeur dans les eaux souterraines à Mogave River (Californie) et à Kearney (Nébraska). Les agents polluants provenant des pesticides et des engrais ont des comportements très variables après leur pénétration, certains s'oxydent, se dégradent, d'autres sont adsorbés et un grand nombre circulent sans réaction avec le terrain. Ainsi par exemple NO_3 , SO_4 , Cl , ne sont pas retenus, PO_4 est fixé sur le complexe argilo-humique par l'intermédiaire des ions Ca , NH_4 et K sont fixés par le complexe absorbant, Na ou Ca peuvent être échangés avec Ca ou Na des argiles.

Il faut encore signaler que les ions radioactifs peuvent être arrêtés au passage de niveaux argileux, suivant le processus classique d'échanges de base.

. . - . Prévention de l'invasion marine dans les zones côtières

La prévention des venues d'eau salée dans ces zones vulnérables consiste à définir au moyen de simulateurs d'écoulement le débit maximal qu'il est possible de prélever sans provoquer de venue d'eau salée. Il faut

pour cela connaître la position du contact eau douce/eau salée et les différents paramètres hydrauliques de la nappe (pente) et du réservoir aquifère (épaisseur, perméabilité, porosité utile). En pratique il faut exploiter la nappe d'eau douce en déterminant les plus faibles rabattements possibles des niveaux et surveiller -notamment par des mesures régulières de résistivité électrique- la position de l'"interface" séparant l'eau douce de l'eau salée.

- Réalisation des captages

Une fois décidée l'implantation des captages, sur les conseils de l'hydrogéologue connaissant parfaitement le système aquifère concerné et sa vulnérabilité à la pollution, l'exécution de l'ouvrage d'exploitation nécessite de grandes précautions : tubage adhérent bien au terrain, résistant à la compression que ce dernier peut exercer, et aux corrosions de toute nature. Le débit d'exploitation doit être également fixé afin que le rayon d'appel du pompage, élément entrant dans la délimitation du périmètre de protection, puisse être défini.

- Périmètre de protection

La protection des ouvrages publics destinés à l'adduction, l'accumulation et la distribution des eaux de consommation, a fait depuis longtemps l'objet de préoccupations de la part des hygiénistes et des règlements ont été édictés dans ce sens. En réalité, du point de vue légal, aucune méthode scientifique n'a été clairement définie pour la détermination des périmètres de protection des captages d'eau destinée à l'alimentation des collectivités humaines. Le plus souvent c'est à un géologue, agissant comme expert officiel mais inégalement compétent en hydrogéologie moderne, que l'on confie le soin d'apprécier la dimension à donner à ce périmètre protecteur. On constate de plus en plus que si du point de vue de la protection contre la contamination bactérienne, le périmètre proposé est en général suffisant, il n'en est pas de même pour la pollution chimique dont la propagation et la rétention dans les terrains sont variables et complexes.

Pour déterminer le périmètre de protection, l'idée venue le plus logiquement à l'esprit des hydrogéologues, en différents pays, consiste à adopter pour périmètre de protection maximal -dans le cas relatif aux captages d'eau souterraine (sources, puits, forages ou drains)- ce qui correspond au périmètre d'appel du captage.

Cette notion a été définie, sous cette dénomination, en premier lieu par H. SCHOELLER (1) (1955), d'un point de vue purement hydrodynamique, liée à celle de "cône, ou zone d'appel", dont le "périmètre" constitue la limite (fig.1.).

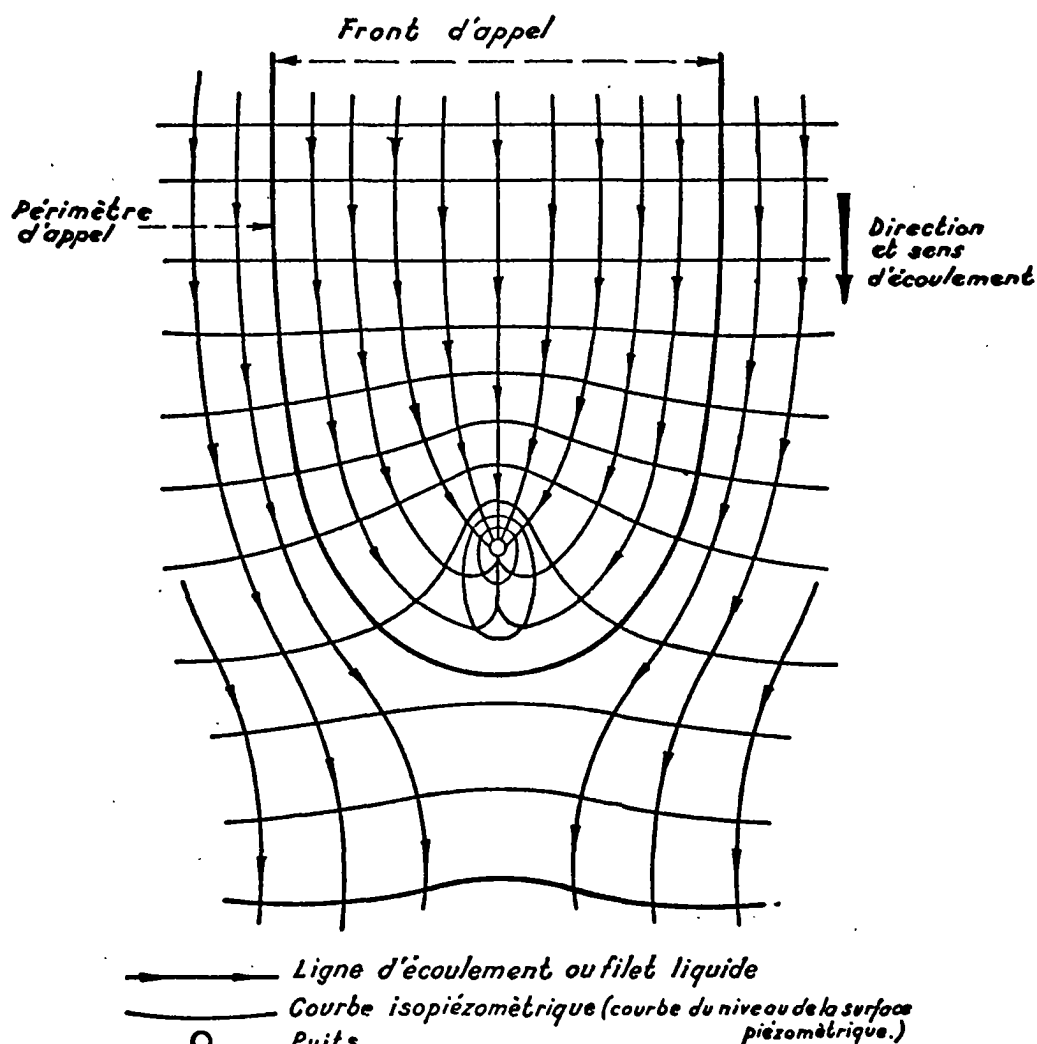


Fig.1- d'après H. SCHOELLER (1955)

(1) Cours d'hydrogéologie à l'Ecole nat. sup. du pétrole, Paris, Technip.1955

Le cône d'appel étant, pour H. SCHOELLER, le domaine dans lequel l'ensemble des filets liquides se dirigent vers le puits ou le forage de pompage et sont donc "captés", le périmètre d'appel est la ligne qui sépare ce domaine du reste du cône d'influence -ou de rabattement- où les niveaux sont influencés par le pompage et où les filets liquides sont déviés, mais sans être captés par l'ouvrage. Ainsi défini, le périmètre d'appel est un cas particulier de ligne de partage des eaux souterraines.

En régime permanent, le périmètre d'appel a l'allure d'une parabole (qui en toute rigueur ne pourrait avoir de fermeture) ; cette dernière n'est assurée que par la limite d'alimentation de la nappe. Dans le cas fréquent de nappes alluviales, la limite est constituée par la rivière qui circonscrit totalement ou partiellement le système aquifère concerné.

Ainsi le "front d'appel" ne définit que la largeur d'une section d'écoulement, mais ne saurait être une limite d'alimentation.

Le périmètre d'appel peut donc être la limite de protection pour l'aval hydraulique de la nappe. Pour la partie amont, on a proposé de définir un rayon protecteur de sécurité qui soit assez grand pour laisser un délai d'intervention suffisant en cas d'alerte de pollution. Ce rayon est une fonction de la vitesse moyenne réelle des eaux souterraines dans le cône d'appel et du délai de sécurité que l'on se donne a priori.

Cependant, il est évident que ce périmètre d'appel peut varier pour un type de nappes donné, suivant le débit prélevé, le régime d'alimentation, l'influence de captages voisins, des variations de niveaux de rivières. Il importe donc de distinguer les conditions ayant un caractère stable de celles qui sont fluctuantes. On pourrait par exemple définir le périmètre d'appel lors d'un pompage d'essai à débit maximal avant la réception du captage et si possible lorsque la nappe est à l'étiage.

Il convient enfin de faire appel, chaque fois que cela est possible, c'est-à-dire lorsque l'on dispose de données hydrogéologiques, aux méthodes modernes de simulations des écoulements que sont les modèles analogiques ou mathématiques. Malheureusement, pour des raisons financières et souvent en l'absence de données, leur réalisation ne peut être envisagée systématiquement pour chacun des ouvrages à protéger.

3.6. Détection des pollutions et remèdes

Dans les zones industrielles où des nappes souterraines limitrophes sont vulnérables à la pollution, il est important de surveiller la composition chimique de l'eau par des prélèvements réguliers effectués sur des forages témoins. Pour être représentatif, l'échantillon doit être collecté après brassage par pompage de façon à obtenir de l'eau du terrain aquifère et non de l'eau souvent stagnante du forage. L'examen hydrogéochimique doit concerner l'ensemble des éléments traces caractéristiques des industries et de l'agriculture locales.

Lorsque de nouvelles zones sont choisies pour être industrialisées il faut procéder à un examen hydrogéochimique général sur l'ensemble des nappes. Ce document de base constituera un élément juridique important lorsqu'il s'agira de localiser le foyer de pollution.

Lorsque survient la pollution accidentelle et que malgré toutes les précautions prises, un captage est menacé, il incombe à l'hydrogéologue de proposer des moyens de parade.

Chaque cas est un cas d'espèce et des solutions de bon sens doivent être mises en oeuvre.

Dans le cas des nappes alluviales très exploitées pour la distribution d'eau de consommation humaine des moyens de parade peuvent être avancés. A noter que dans ce cas, la pollution provient de la rivière dont l'eau est amenée -bactériologiquement filtrée par les terrains- au forage d'exploitation.

L'hydrogéologue doit :

- définir le temps qui s'écoulera entre l'instant du déclenchement de la pollution dans la rivière et son arrivée au captage. Une telle détermination est possible en prenant en considération le système aquifère concerné, les paramètres hydrauliques du terrain, le colmatage de la berge de la rivière
- prévoir l'exécution éventuelle d'un ou plusieurs puits intermédiaires entre la rivière et le captage pour pomper efficacement l'eau polluée
- prévoir l'exécution éventuelle de puits d'injection d'eau superficielle non polluée pour refouler la pollution. Ce type de parade a été utilisé en Californie pour repousser l'invasion marine qui s'était installée dans la zone côtière à la suite de surexploitation.

A N N E X E

Index bibliographique sur les périmètres de protection des captages d'eau d'alimentation

BELICKIJ A.S. (1955)

Détermination des limites du second périmètre de protection sanitaire des sources souterraines d'adduction d'eau.

(Vodosnabzh. Sanit. Teckhn., U.R.S.S., n° 3, 1955)

BELICKIJ A.S. (1961)

Question de l'argumentation hydrogéologique des périmètres de protection sanitaire des sources souterraines d'adduction d'eau.

(Gig.i. Sanit., U.R.S.S., n° 1, 1961)

BUYDENS R. (1962)

Les zones de protection des captages des eaux souterraines.

(La technique de l'eau et de l'assainissement, Belgique, n° 182, 15,11, 1962)

CIOC D., TROFIN P. (1956)

Determinarea mărimii perimetrului de regim sever al zonei de protecție sanitară la captările de apă subterană.

(ed. Institutului de construcții, București, Roumanie, 1956)

GEORGESCU D.

Contribution au calcul des zones de protection sanitaire des captages dans les nappes aquifères.

(Roumanie)

HAWERMAN B. (1968)

Protected areas for ground water sources.

(Wenner-Gren Center, internation. symp., Ser-G.B., 1968, t. 11, p. 123-152)

KELLER G. (1967)

Contribution hydrogéologique au problème des périmètres de protection pour les aquifères poreux.

(Assoc. intern. hydrogéologues, mém., 1967, vol. 7, p. 176-178)

LANDES Th.

Contribuția la calculul zonei de protecție restrânsă a instalațiilor de alimentare cu apă potabilă din terenurile nisipoase și cu pietriș.

(Bohrtechnik-Brunnenbau, Rohrleitungsbau, vol. IX, n° 9)

SALTYKOV E.V.

Etablissement des projets de périmètres de protection sanitaire des sources d'adduction d'eau.

(Izd. Min. Kommunal. Khoz, R.S.F.S.R., U.R.S.S.)

VERNIER J., FEUGA B., SOMMELET J. (1970)

Le tracé des périmètres de protection autour des captages d'eau.

(Rapport inédit B.R.G.M., Service géologique d'Alsace et de Lorraine, France)

VIBERT A. (1969)

Les périmètres de protection des captages d'eau potable.

(Travaux, France, déc. 1969)

VLADIMIRSKIJ V.I. (1962)

Les critères hydrogéologiques de délimitation des zones de protection sanitaire des sources souterraines d'adduction d'eau.

(Prosp. et prot. sous-sol, U.R.S.S., n° 8, 1962, Trad.BRGM n° 3995)

Anonyme (1968)

Périmètres de protection autour des points de prélèvement des eaux.

(Eaux, France, 1968/01, num. 1, p. 17-18)

Pollution des eaux souterraines
Bibliographie sommaire (études générales)

California State Water Pollution Contrôl Board (1954)

Report on the investigation of travel of pollution.

(Sanit. Engng., Research Lab., U.S.A., pub. 11, 218 p.)

JAMMET (1956)

Les risques de pollution des eaux par les produits radioactifs.

(L'eau, n° 12)

KEILLING J. (1956)

La contamination du sol et des eaux par les produits utilisés en agriculture.

(L'Eau, Fr., n° 12, p. 277-81)

MICHELS, WABERT, UDLUFT, ZIMMERMANN (1959)

Gutachten zur Frage des Schutzes des grundwassers gegen verunreinigung durch lagerflüssigkeiten.

(Bad Godesberg, Bundesminist. für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft, Juni, 108 p.)

NEWELL J.L., ALMQUIST F.O.A (1960)

Pollution des eaux souterraines par des détergents synthétiques.

(J. New Engl. Wat. Works Ass., U.S.A., 74, n° 1, p. 61-74)

McKEE J.E. (1961)

Research needs in ground waters pollution.

(J. Wat. Pollut. Control Federat., U.S.A., 33, n° 12, p. 1227-33)

U.S. Department of Health, Education and Welfare-Proceedings of the 1961 Symposium

Ground water contamination.

(Cincinnati, Oh., Robert A. Taft Sanitary Engng Center, Techn. report W 61-5, 218 p.)

COLAS R. (1962)

La pollution des eaux.

(Paris, P.U.F., Coll. "Que sais-je ?" n° 983, 125 p.)

ABRARD R. (1963)

Les conditions géologiques des décharges contrôlées d'ordures ménagères.

(Techn. Sci. municip., Fr., n° 11, p. 371-375)

DEUTSCH M. (1963)

Ground water contamination and legal controls in Michigan.

(Geol. Surv. Wat. Supply Paper, U.S.A., 1691, 79 p.)

McKEE J.E., WOLF H.W. (1963)

Water quality criteria.

(The resource Agency of California, State water quality control Board publ. n° 3-A, Sacramento, 1963 G-700, 542 p.)

COUTRIS R. (1964)

Pollution de l'eau et du sol par produits pétroliers.

(Techn. Sci. municip., Fr., n° 8-9, p. 271-294)

FAUST S.D., ALY O.M. (1964)

Water pollution by organic pesticides.

(J. amer. wat. works Ass., U.S.A., 56, n° 3, p. 267-279)

LEGRAND H.E. (1964)

System for evaluation of contamination potential of some waste disposal sites.

(J. amer. Wat. works Ass., U.S.A., 56, n° 8, p. 959-974)

PRAT J., GIRAUD A. (1964)

La pollution des eaux par les détergents.

(Paris : Organisation de coopération et de développement économique, 90 p.)

ALBINET M. (1965)

La pollution des eaux souterraines.

(B.R.G.M. Chronique d'hydrogéologie, Fr., n° 6, juin 1965, p.7-56)

DEGOT B. (1965)

La pollution des eaux par les matières radioactives.

(B.R.G.M. Chronique d'hydrogéologie, Fr., n° 6, juin 1965, p.57-63)

LEGRAND H.E. (1965)

Patterns of contaminated zones of water in the ground.

(Water Resources Res., 1, 1, 83-95)

VUILLAUME Y. (1966)

Les conditions d'épuration naturelle des eaux souterraines par les roches aquifères filtrantes (pollution par les micro-organismes).

(Rapport B.R.G.M., DS 66 A 67, Fr., 50 p.)

MARGAT J., ALBINET M. (1968)

La pollution des eaux souterraines par les eaux de surface.

(Revue de l'Institut Pasteur de Lyon, 1967-1968, t. 1, n° 2, p. 235-253)

BABOT Y., SIMLER L. (1969)

La pollution des eaux souterraines. Etude bibliographique.

(Rapport du Service géologique d'Alsace et de Lorraine, Fr., Juillet 1969, 72 p.)

BABOT Y., SIMLER L. (1969)

Pollution des eaux souterraines par les hydrocarbures. Etude bibliographique.

(Rapport du Service géologique d'Alsace et de Lorraine, Fr., novembre 1969, 104 p.)

Commission économique pour l'Europe. Comité des problèmes de l'Eau (1969)

Comptes rendus du cycle d'étude sur la protection des eaux de surface et des eaux souterraines contre la pollution par les produits pétroliers.

(Genève, décembre 1969)

ZILLIOX L. (1969)

Etude physique des écoulements de liquides miscibles en milieu poreux. Application à la pollution des eaux souterraines (modèles physiques, dispersion dynamique).

(Thèse d'Etat, Université de Strasbourg, 28/10/1969, 104 p.)

BABOT Y., SIMLER L. (1970)

Pollution des eaux souterraines. Etude bibliographique.

(Rapport du Service géologique d'Alsace et de Lorraine, Fr., février 1970, 179 p.)

BARRES M. (1970)

Evacuation et traitement des résidus urbains. Etude documentaire. Les décharges contrôlées d'ordures ménagères.

(Rapport B.R.G.M., 70 SGN 062 BGA, Fr., 21 p.)