

## GESTION ET PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES EN FRANCE

Jean-Claude ROUX<sup>1</sup>

**RESUME.** Les eaux souterraines constituent une ressource économique et écologique de première importance en France, avec 200 aquifères libres ou captifs dont les réserves renouvelables sont estimées à 100 milliards de m<sup>3</sup> par an, dans lesquelles 7 milliards de m<sup>3</sup> sont puisés annuellement dont 63% pour l'alimentation en eau potable. Mais les eaux souterraines sont souvent vulnérables et depuis quelques décennies toutes sortes de pollutions diffuses ou ponctuelles sont apparues et s'amplifient dans de nombreuses régions. Les causes proviennent essentiellement du comportement des utilisateurs du sol et du sous-sol par manque de réglementation dans le passé, mais surtout par défaut de connaissances et de sensibilisation, vis-à-vis de la valeur du patrimoine que constituent ces ressources cachées, et de leur fragilité, ou par négligence ou absence de sens civique.

La contamination par les nitrates est la plus importante par son extension sur les trois quarts des aquifères avec des teneurs qui n'ont cessé de s'accroître depuis une trentaine d'années et ont dépassé dans plusieurs régions le seuil fatidique des 50 mg/l de la norme européenne, voire les 100 mg/l en quelques secteurs très localisés. Les autres catégories de pollution, d'origine minière, industrielle ou urbaine, bien que ponctuelles ou sectorielles, sont plus lourdes de conséquences par les produits minéraux ou organiques qu'elles propagent. Le cumul de ces contaminations est grave du point de vue économique, tel que l'abandon de champs captants, écologique, patrimonial par la dégradation durable dans certaines régions très urbanisées et industrialisées de vastes superficies d'aquifères, et sociaux par la méfiance du consommateur vis-à-vis de l'eau de distribution publique.

Le bilan national des pollutions et de leurs conséquences est encore incomplet et les prévisions d'évolution à moyen terme sont difficiles. Les exemples de travaux de décontaminations des aquifères démontrent que les méthodes mises en oeuvre sont onéreuses et souvent imparfaites, et que la conservation de la qualité des eaux souterraines passe prioritairement par des mesures préventives. La pollution des eaux souterraines n'est pas une fatalité car tout d'abord, il existe des grandes parties d'aquifères mieux protégés, loin des zones urbaines et industrielles où l'eau est encore de bonne qualité, et dans lesquelles la croissance des teneurs en nitrates reste faible. Ensuite, une politique de prévention a été engagée ou renforcée vers la fin des années 1970 avec la mise en oeuvre de réglementations plus contraignantes. Parallèlement, une politique volontariste d'information et d'incitation financière a été mise en place vers 1985 pour assurer de meilleures pratiques culturelles. Par ailleurs, les procédures de protection des zones de captages ont été intensifiées. Les effets positifs de ces mesures sont déjà perceptibles. Enfin, la nouvelle loi sur l'eau de 1992 rend obligatoire la création de périmètres de protection pour l'ensemble des captages publics en service, l'assainissement des communes et permet l'établissement de schémas d'aménagement et de gestion des eaux comprenant des zones de sauvegarde et des objectifs de qualité.

L'examen de la situation actuelle et la conjonction des moyens de prévention, s'ils sont convenablement utilisés, permettent d'être raisonnablement optimiste pour l'avenir, et les eaux souterraines devraient converser leur rôle primordial, économique et sanitaire.

**MOTS-CLES:** France, eaux souterraines, eau potable, vulnérabilité, pollution, nitrates, prévention, réglementation.

**ABSTRACT. Groundwater management and protections in France.** France is rich in groundwater. It has 200 aquifers with renewable resources which are estimated at 100 billion m<sup>3</sup>/year of which 7 billion m<sup>3</sup> are withdrawn each year, mainly for human consumption.

Nevertheless, free aquifers, in spite of natural physical and geochemical barriers, are not sufficiently protected from anthropic surface contamination and when pollutants reach them, the consequences are never negligible, be it from a sanitary, economic or natural heritage point of view. The most extensive pollution is nitrate contamination. Nitrate concentrations have been increasing constantly over the last 30 years and in some regions have gone over the critical threshold of 50 mg/l which is the European standard, and concentrations of 100 mg/l have even been measured in some places. The gravity of other types of pollution - mining, industrial or domestic - is determined by the mineral or organic products involved.

<sup>1</sup> BRGM, Chargé de mission «Eau» à la Direction du Service Géologique National, Secrétaire du Comité français de l'AIH, B.P. 6009 - F-45060 Orléans Cedex 02.

The cumulative effect of this pollution is serious from various standpoints: economical and environmental, and for our natural heritage because of the long term degradation of vast aquifers in some very urban and industrial regions. We might, therefore, question the possibility of the long term use of aquifers as a source of drinking water.

Indeed, first of all, there are large parts of aquifers well protected, far from urban and industrial zones, where the water is still of high quality, and the increase in nitrate content is low. Furthermore, preventive measures were begun or reinforced in the late 1970's with the implementation of stricter regulations. At the same time, a strong policy of information and financial incentives were set up in 1985 in order to promote environmentally sound agricultural practices. Furthermore, procedures for the protection of well fields were strengthened. The positive effects of these measures can already be seen. Finally, the new water law of 1992 makes the creation of protection perimeters around all working public well fields and water treatment by cities and towns mandatory, and creates the framework for drawing of Water Management Plans.

The examination of the current situation and the joint use of preventive measures, if they are used wisely, allow us to be reasonably optimistic as to the future, and aquifers should keep their crucial, economic and sanitary role.

**KEY WORDS:** France, underground water, drinking water, vulnerability, pollution, nitrates, preventives measures, relementation.

## 1. IMPORTANCE ET RÔLE DES EAUX SOUTERRAINES

Les eaux souterraines constituent la quasi-totalité des stocks d'eau douce liquide des terres émergées (98 à 99 %) ce qui représente une dizaine de millions de milliards (1016) de mètres cubes, soit cent fois plus que les lacs et les fleuves pris à un instant donné. Moins importantes que les masses de glace de la planète (28 millions de milliards de m<sup>3</sup>), elles sont, en revanche, mieux distribuées sur tous les continents, et environ un tiers du débit total des eaux courantes terrestres circule dans le sous-sol, suivant des trajets plus ou moins longs et lents, parfois à grande profondeur (1000 à 2000 m).

Sans leur écoulement invisible, rarement observable, sauf dans les cavernes et conduits chers aux spéléologues, jouant sur de gros volumes et régulier, il n'y aurait ni sources, ni rivières permanentes, car les eaux souterraines, en continuité avec les eaux de surface, sont les mères nourricières et les grandes régulatrices des cours d'eau.

Les eaux souterraines sont exploitées et utilisées par la vie et l'humanité depuis l'origine des temps et l'on estime à 700 milliards de m<sup>3</sup> les quantités d'eau prélevées actuellement chaque année dans l'ensemble des aquifères du monde, faisant des eaux souterraines le plus fort tonnage de matière première minérale extraite du sous-sol.

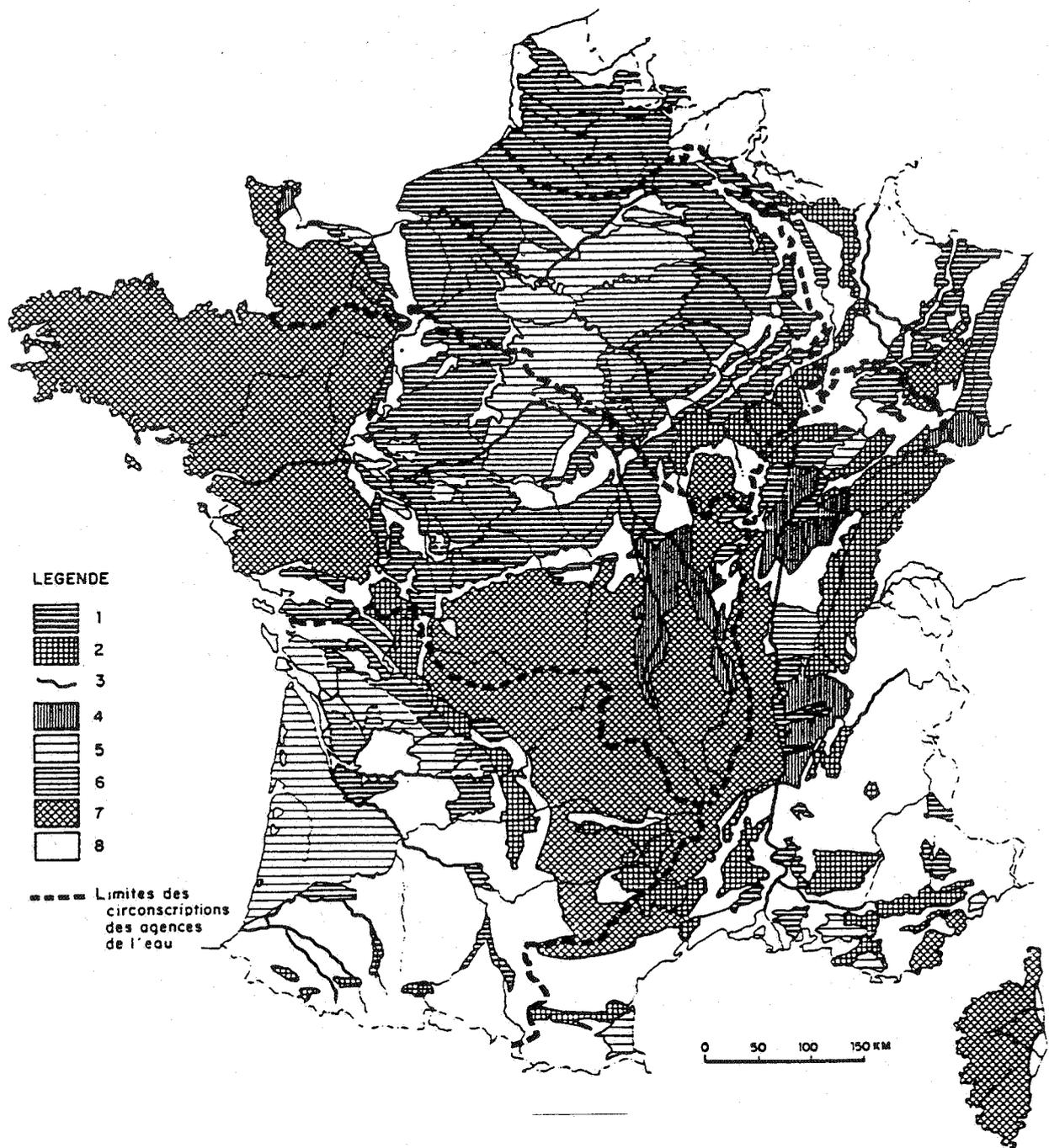
Les eaux souterraines présentent de nombreux avantages par rapport aux eaux de surface :

Au plan quantitatif, la capacité de stockage et l'inertie des aquifères homogènes, leur régime très régulier, leur permettent de jouer un rôle de tampon entre les pluies très inégales dans le temps et les sorties beaucoup plus régulières dans les sources compensant ainsi les aléas climatiques et assurant à peu près normalement les besoins en eau lors des années de sécheresse. Leurs possibilités à soutenir longtemps un débit de produc-

tion et à alimenter le réseau superficiel est énorme. Ce sont de véritables «nourrices» des cours d'eau et milieux aquatiques durant les périodes critiques. De fait, en France, lors de la sécheresse de 1976, et plus encore, de la succession d'années sèches que nous avons connu depuis 1989, les nappes ont beaucoup baissé, mais on n'a pas connu de véritables problèmes d'alimentation en eau ou d'assèchement de rivières. D'ailleurs dans les aquifères puissants, même si la nappe baisse au-dessous du niveau des vallées, l'épaisseur de terrain saturé d'eau reste grande. Le tarissement des nappes affecte essentiellement leur rôle écologique pour les milieux humides, mais la capacité d'alimentation des forages est toujours importante. Des expériences de surexploitation ont montré que l'on pouvait même «emprunter», prélever davantage que les réserves régulatrices durant quelques semaines, et que la restitution, le «remboursement» intervient l'hiver d'après ou les années suivantes. Même les aquifères karstiques disposent en profondeur d'importantes réserves mobilisables.

Au plan qualitatif, par la présence de formations superficielles protectrices, de leur profondeur, du pouvoir filtrant de la plupart de leurs réservoirs, du colmatage des berges de cours d'eau, leur protection est généralement meilleure que celle des eaux de surface vis-à-vis des pollutions massives. Leur qualité physico-chimique et leur température sont assez constantes et certaines d'entre elles peuvent être consommées sans traitement, même bactériologique. Les nappes profondes captives peuvent être considérées comme de véritables réserves stratégiques qui pourraient alimenter des installations de secours ou fournir des eaux de qualité supérieure.

Au plan économique enfin, dans les pays bien pourvus en aquifères, la ressource en eau est aisément mobilisable sans tirer de longues canalisations, avec des coûts de captage, de traitement et de dépenses d'énergie moins élevés.



**Figure 1.** Principales nappes libres du territoire français classées par type d'aquifère et d'unité de gestion - J. Margat, 1990.

1. Nappes étendues, y compris les plaines alluviales (aquifères monocouches, poreux ou fissurés, à nappe libre).
2. Aquifères karstiques, sans nappe souterraine continue.
3. Nappes alluviales des principales vallées fluviales, liées aux cours d'eau.
4. Ensembles de nappes locales emboîtées dans des réservoirs peu perméables mais de grande capacité, qu'elles drainent.
5. Nappes étendues communiquant avec des nappes plus profondes qu'elles alimentent (aquifères multi-couches à nappe supérieure libre).
6. Nappes médiocres, en terrains peu perméables, recouvrant des nappes plus profondes captives mieux exploitables (aquifères multi-couches à couverture semi-perméable).
7. Massifs de roches dures fracturées («socle» schisteux ou cristallin et roches sédimentaires anciennes), à aquifères localisés et compartimentés.
8. Domaine sans nappe libre, en région de plaine, ou à aquifères localisés et compartimentés, en montagne.

## 2. CAPITAL ET UTILISATION DES EAUX SOUTERRAINES EN FRANCE

La France est riche en eau souterraine. Son sous-sol renferme 200 aquifères d'importance régionale bien répartis sur les 2/3 du territoire. Parmi eux, 175 sont libres dont 40 karstiques et 15 alluvionnaires et 25 sont captifs et plus ou moins profonds (Figure 1).

Les bassins sédimentaires de Paris, d'Aquitaine, d'Alsace, le couloir Rhône-Saône et le Languedoc-Roussillon sont bien dotés en eau souterraine :

- nappes libres de la Craie du Nord, de Normandie, Picardie, Champagne, des calcaires de Beauce.
- aquifères alluviaux de la plaine d'Alsace, de Provence et du Roussillon mais aussi des principaux cours d'eau : Seine, Loire, Rhône, Durance...
- nappes captives profondes de l'Albien du Bassin de Paris, du Calcaire carbonifère du Nord de la France et du grès triasique de Lorraine ; aquifère semi-captif du Tertiaire d'Aquitaine.

Dans les régions calcaires alpines, pyrénéennes et dans l'auréole du Massif Central, les «réseaux karstiques» sont largement développés : Fontaine de Vaucluse (25 m<sup>3</sup>/h), Gorges du Tarn.

Mais les terrains cristallins, schisteux ou volcaniques, par leur fissuration et la présence de zones superficielles altérées, sont également le siège de petites nappes localisées ou de circulations fissurales donnant naissance à de nombreuses sources de faible débit contribuant à la régularisation des cours d'eau. Ainsi la sécheresse exceptionnelle de 1976 provoqua un développement des forages dans les formations de socle qui démontra que, sous réserve d'une implantation optimale dans les zones fracturées, des débits de quelques m<sup>3</sup> à quelques dizaines de m<sup>3</sup>/h pouvaient être obtenus et satisfaire aux besoins minimaux de la distribution d'eau potable ou des agriculteurs.

On estime la capacité des aquifères français à 2000 milliards de m<sup>3</sup> et 100 milliards de m<sup>3</sup> s'écoulent annuellement vers les exutoires naturels ou les zones de prélèvement.

Les réserves des nappes du Bassin de Paris sont à elles seules supérieures à tous les barrages retenues de France. Des réserves renouvelables de l'ensemble des aquifères français équivalent à 100 barrages de Serre-Ponçon. Mais on n'y prélève que 7 milliards de m<sup>3</sup>/an soit un tiers des réserves facilement mobilisables sans nuire aux eaux de surface : 50 % pour l'alimentation en eau potable, 25 % pour les industries et 25 % pour l'agriculture et autres usages.

La moitié des prélèvements est effectuée dans les vallées où les besoins humains et industriels sont les plus

grands et où la productivité des aquifères est généralement la meilleure. La participation des eaux souterraines pour la distribution d'eau potable est importante puisqu'elle couvre en moyenne 61 % des besoins de la population et que 85 % des communes sont alimentées uniquement à partir d'eaux souterraines, au moyen de 29 000 captages, atteignant presque 100 % dans certaines régions (Champagne).

En France les eaux souterraines sont généralement de bonne qualité physico-chimique. Dans les montagnes et massifs anciens, elles sont faiblement minéralisées et dans les bassins sédimentaires et leurs vallées, leur qualité est moyenne. Localement certaines ont une mauvaise qualité naturelle : agressives et ferrugineuses dans les formations cristallines et les roches siliceuses, dureté excessive dans des aquifères carbonatés, présence de fer et de manganèse dans certaines nappes alluviales, chlorures dans les zones littorales et les estuaires, turbidité élevée dans certains aquifères fissurés, parfois du fluor en teneur légèrement supérieure à la norme, surtout en nappes captives, et parfois un taux de radioactivité supérieur aux normes admissibles dans les régions uranifères, mais cela ne représente qu'un pourcentage infime des ressources totales en eaux souterraines. Des aquifères profonds tel l'Albien du Bassin de Paris ou le Tertiaire du Bassin d'Aquitaine, renferment des eaux douces parfois jusqu'à 2000 m de profondeur âgées de 30 à 40 000 ans. Les eaux souterraines sont aptes, dans leur ensemble, à presque tous les usages, mais peuvent nécessiter localement un traitement correcteur. La réglementation de la Santé publique stipule d'ailleurs que l'on ne doit faire appel aux eaux de surface pour la distribution d'eau destinée à la consommation humaine qu'après avoir fait la preuve que la ressource en eau souterraine est inexistante, insuffisante ou de mauvaise qualité.

## 3. BILAN ET ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ

Bien qu'elles soient exploitées et utilisées par l'humanité depuis des millénaires, les eaux souterraines sont encore mal connues voire ignorées du public, ce qui explique non seulement bien des erreurs de gestion mais la croyance d'une invulnérabilité quasi-totale, d'une purification presque miraculeuse, laissant penser à beaucoup que le milieu souterrain peut impunément tout absorber.

Or la plupart des aquifères, à l'exception de ceux qui sont captifs, sont fragiles et vulnérables aux pollutions, comme l'ensemble des faits constatés depuis quelques dizaines d'années, où l'on s'est intéressé à la qualité de la ressource, l'a malheureusement trop bien mis en lumière. Certes il existe un certain nombre de protections naturelles tels que les formations superficielles,

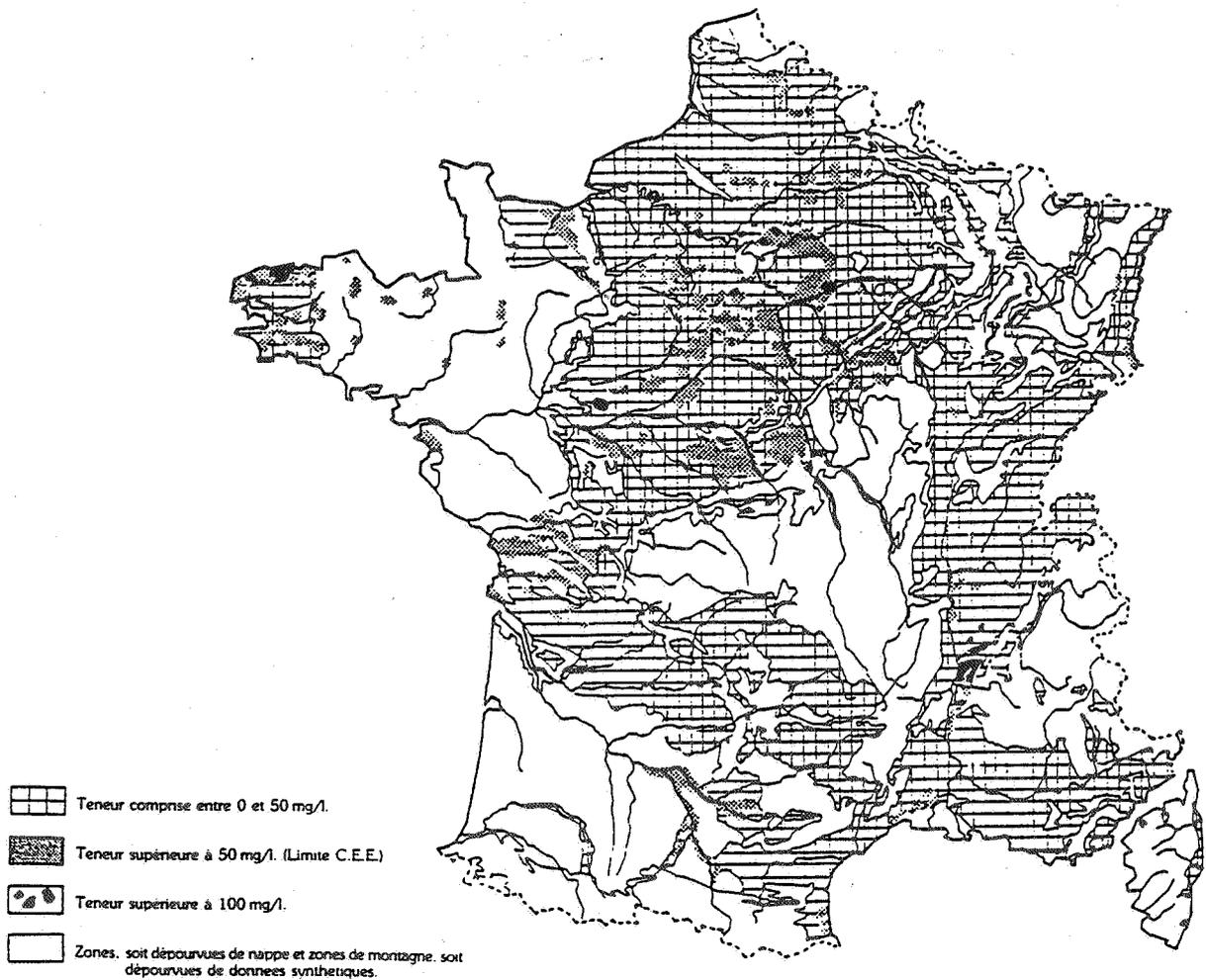


Figure 2. Carte simplifiée de la teneur en nitrates dans les eaux souterraines (BRGM, 1986).

les terrains non saturés, le colmatage des berges de cours d'eau, qui peuvent jouer un rôle de barrières étanches, filtrantes, ou piéger certains éléments, mais ces effets ne doivent pas être surestimés, et l'on n'est pas certain de leur effet à long terme.

Ces ignorances, la surestimation des protections et le non-respect de la réglementation sont la cause de nombreuses contaminations et l'on a assisté, progressivement, à l'apparition et l'amplification de pollutions diffuses ainsi qu'à la multiplication de cas de contamination ponctuelle.

La montée en puissance de la contamination par les nitrates est le plus grand fléau, car elle touche les 3/4 des aquifères libres français, (Figure 2) et près de 900.000 personnes dont l'eau des réseaux d'alimentation publique dépasse la norme sanitaire de 50 mg/l, malgré l'abandon de quelques centaines de captages ou la mise en service d'unités de dénitrification. Les croissances des concentrations en nitrates ont été plus ou moins fortes mais régulières, depuis 20 à 40 ans,

dans la plupart des aquifères : 2 à 3 mg/l/an sur certains captages des calcaires et de la craie du Bassin de Paris ; (Figure 3) l'augmentation moyenne variant de 0,3 mg/l et 1,6 mg/l, et jusqu'à 4 mg/l en Bretagne.

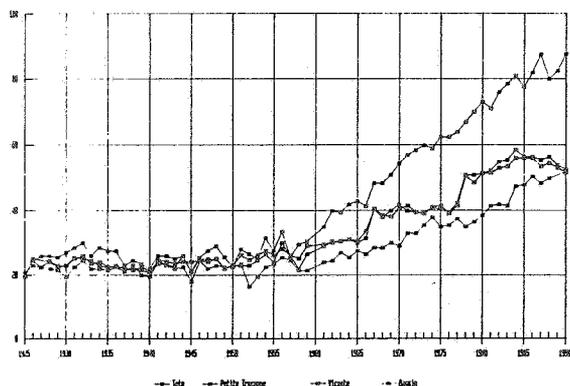


Figure 3. Evolution des teneurs en nitrates dans des sources du calcaire de Champagne (Seine et Marne) - SAGEP.

Les aquifères les plus touchés sont les alluvions des grandes vallées, la craie et les calcaires du Nord et du Bassin de Paris et les formations de socle de Bretagne. Mais dans chacun d'eux les teneurs peuvent être extrêmement variables à quelques kilomètres de distance : 5 à 50 mg/l dans la craie de Normandie, 15 à 110 mg/l dans les calcaires de Beauce au Nord d'Orléans (Figure 4), du fait précisément des différences d'exposition aux risques des eaux souterraines, car on a parfaitement mis en évidence la concordance entre les fortes teneurs en nitrates des nappes, leur degré de vulnérabilité et les zones d'agriculture intensive. Un problème récent, qui mérite la plus grande attention, est la pollution diffuse par les pesticides, principalement l'atrazine, que l'on détecte sur 20 à 30 % des points d'eau contrôlés, heureusement à une teneur généralement inférieure à la teneur limite de 1 µg/l (Figure 5). On ne sait pas encore bien comment ces produits organiques évoluent dans les sols profonds et les aquifères et si des risques de croissance de ces pollutions sont à craindre.

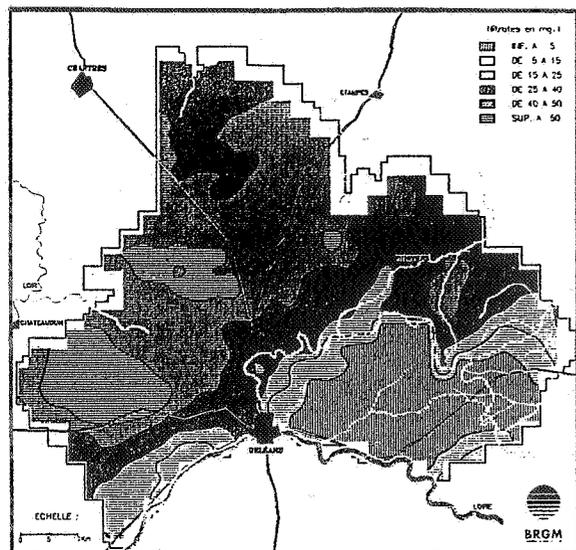


Figure 4. Répartition des teneurs en nitrates dans la nappe des calcaires de Beauce (Loiret) en 1984 - BRGM.

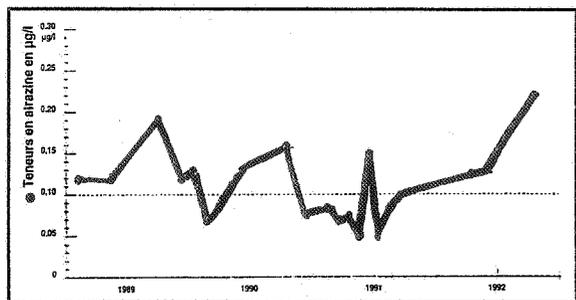


Figure 5. Variation des teneurs en Atrazine dans un puits de la nappe du calcaire de Beauce (Loiret) - Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

Les pollutions chimiques d'origines industrielles et minières bien que plus localisées ont des conséquences beaucoup plus graves. Dans ces secteurs d'activité de grandes portions de nappes peuvent être contaminées par des chlorures, sulfates ou nitrates auxquelles s'ajoutent des tâches de pollutions plus restreintes par divers métaux, hydrocarbures, solvants organiques ou des phénols et goudrons acides. La contamination plus étendue à partir d'une seule activité concerne la nappe de la plaine d'Alsace, à l'aval du bassin potassique de Mulhouse, provoquée par le stockage, depuis 1920, de 20 millions de tonnes de chlorure de sodium dans une dizaine de terrils (Figure 6). On estime l'infiltration dans la nappe à 113 000 tonnes en moyenne par an. Elle s'étend sur une superficie de 20 000 ha et à plus de 50 km à l'aval, faisant sentir ses effets jusqu'à Colmar (Figure 7), où l'eau de la nappe contient encore 300 mg/l de chlorure.

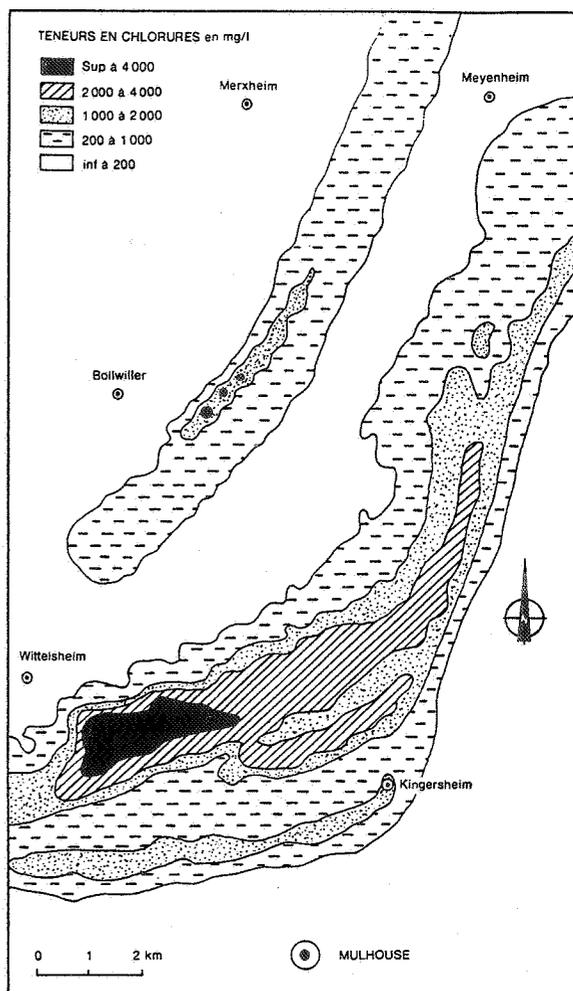


Figure 6. Teneurs en chlorure dans la nappe de la plaine d'Alsace - BRGM.

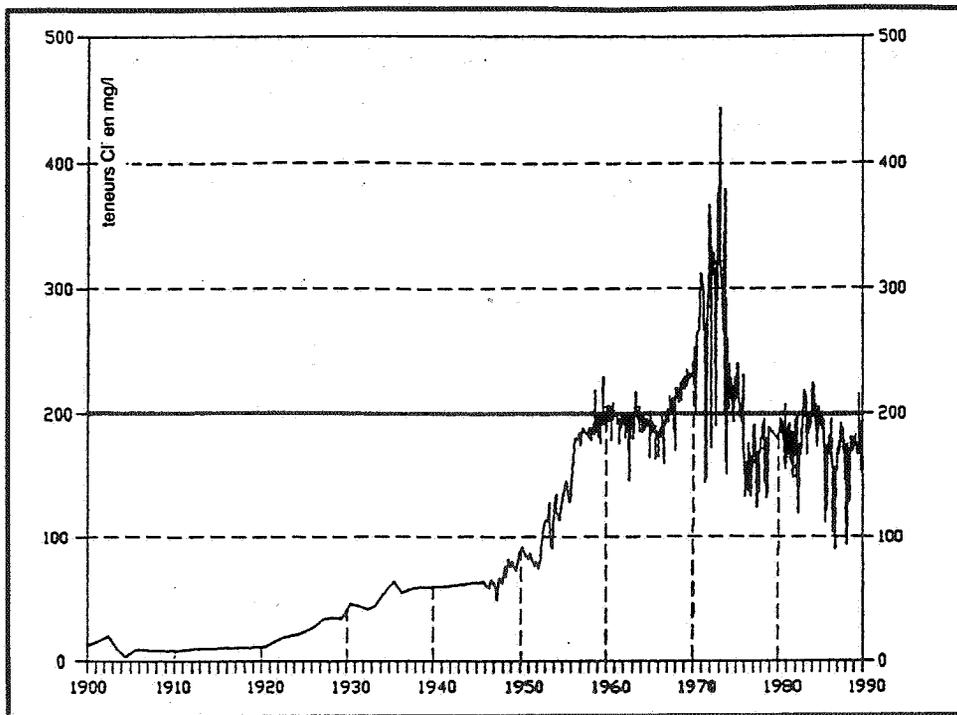


Figure 7. Historique de l'évolution des teneurs en chlorures dans un puits d'alimentation en eau potable de la ville de Colmar (68) - BRGM.

Presque tous les aquifères sous les anciennes régions industrielles et minières sont touchés par ces pollutions de natures diverses et cumulées. Beaucoup d'entre elles sont liées à des terrils et à des stockages de déchets solides ou liquides, non étanches : bassin minier Nord (500 km<sup>2</sup>), Lorraine, vallée de la Seine à Rouen, couloir de la chimie au Nord de Lyon. Ainsi, un cas grave de contamination par solvants organiques est apparu en 1986 dans la banlieue de Mulhouse. L'infiltration de chloronitrobenzène sous d'anciennes décharges industrielles une douzaine d'années plus tôt avait pollué la nappe d'Alsace jusqu'à des teneurs de 1 mg/l. Le polluant s'est propagé à la vitesse de 500 m/an et a contaminé des forages d'eau potable alimentant 35 000 personnes, nécessitant leur abandon.

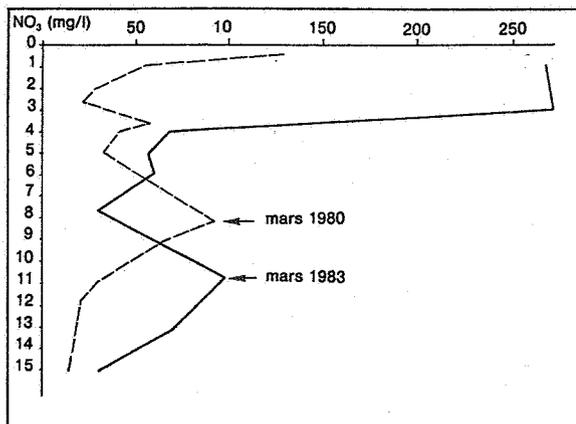
Les contaminations par hydrocarbures, souvent liées à des fuites ou ruptures de cuves ou d'oléoducs sont nombreuses. La plus importante a été révélée en 1990 près de Rouen, où l'on a évalué à 20 000 m<sup>3</sup> le volume de supercarburant et de fuel répandu dans la nappe de la craie et des alluvions de la Seine.

Même en dehors des secteurs industriels, les eaux souterraines ne sont pas à l'abri des pollutions chimiques, car les transports ne sont pas sans risques pour elles. Témoin ce déversement de 200 m<sup>3</sup> de supercarburant en 1990 dans la nappe de la Vallée du Rhône entre Vienne et Valence, suite au déraillement d'un train.

Si les pollutions accidentelles sur le domaine public sont vite identifiées et permettent la mise en place immédiate de plans d'intervention, il n'en est pas de même des pollutions anciennes ou chroniques, dont l'origine est souvent sur le domaine privé et qui ne sont pas déclarées.

Qu'elles soient dues à la négligence, à la malveillance ou à l'accident, nombre de ces pollutions sont inconnues. Elles peuvent mettre plusieurs dizaines d'années avant d'être découvertes dans un captage, une source, ou lors de travaux. Ce sont de véritables «bombes à retardement». Le record de ces pollutions «historiques» est de 120 ans.

En ce qui concerne les pollutions d'origine agricole des aquifères vulnérables sous cultures intensives, «secteurs à haut risque», les teneurs peuvent encore doubler dans les 40 ans si on ne réduit pas les épandages d'engrais, ou les pertes d'azote, de manière significative. Pour l'ensemble des aquifères du bassin de la Seine, le quart de la superficie pourrait voir ses teneurs s'accroître vers une limite comprise entre 50 et 100 mg/l en nitrates. En Alsace, on estime que la superficie de nappe rendue inutilisable pour l'eau potable pourrait décupler, atteignant la moitié de la surface de cet aquifère. On est certain, à moyen terme, sans toutefois pouvoir le quantifier, que les valeurs augmenteront inévitablement dans les aquifères les plus pro-



**Figure 8.** Migration verticale d'un front de nitrates dans la craie non saturée de Champagne - Site expérimental de Connantre (51) - BRGM 1984

fonds, dans lesquels les stocks de nitrates n'ont pas encore totalement atteint le niveau des eaux souterraines, car, rappelons-le, il peut falloir 30 à 40 ans, dans certains aquifères libres poreux pour qu'un polluant miscible atteigne la surface de la nappe. (Figure 8) Ce processus peut malheureusement être accéléré par les pratiques irresponsables des hommes qui mettent en communication des aquifères captifs, bien protégés, avec des nappes superficielles polluées par des forages de mauvaise qualité technique.

La maîtrise de toutes ces pollutions est difficile. Si l'on ne supprime pas leur cause ou si l'on ne met pas en oeuvre des moyens suffisants de diagnostic et de résorption des polluants, certaines pourront encore durer un siècle et peut-être davantage.

Une note positive s'inscrit dans ce bilan par l'existence de phénomènes de dénitrification naturelle. En effet, lorsque certaines nappes sont captives ou que le réservoir contient des pyrites les teneurs en nitrates peuvent décroître fortement grâce aux conditions réductrices du milieu. Des constatations analogues ont été faites dans les plaines alluviales où la végétation de bordure des cours d'eau, les «ripisylves», réduit les teneurs en nitrates de manière significative.

#### 4. L'IMPACT DES POLLUTIONS SOUTERRAINES SUR LA SOCIÉTÉ

Les pollutions ont des conséquences nombreuses et variées. Bien que les nitrates ne semblent plus responsables d'incidents sur la santé depuis de nombreuses années, malgré un certain dépassement des normes, la crainte du risque entraîne des réactions irraisonnées de la part du consommateur qui confond seuil d'alerte et danger immédiat pour sa santé. Un quart de la po-

pulation se tourne alors, pour la boisson, vers les eaux embouteillées, même si leur coût est de 500 à 1 000 fois plus élevé que celui du réseau public, que leur composition chimique soit parfois identique, ou que certaines d'entre elles, ne soient pas sans risque sur la santé car comportant des éléments très au-dessus des normes de potabilité elles devraient être considérées comme des médicaments !

Or la France, avec une consommation de 5,5 milliards de bouteilles d'eau par an, se place dans les tout premiers consommateurs mondiaux d'eau embouteillée, avec un chiffre d'affaires de 10 milliards par an.

Les incidences économiques sont considérables. De 1986 à 1988, 90 captages d'eau souterraine ont été l'objet de pollutions accidentelles. Le coût du traitement des nitrates et des pesticides dans l'eau destinée à la consommation humaine peut atteindre 1 F/m<sup>3</sup>. Celui des travaux de remplacement ou de réhabilitation de captages pollués varie entre 1 et 50 millions de francs. Or on peut estimer à 2000 le «parc de forages» mis hors d'usage pour «cause de pollution durable» et les dépenses d'investissement prévisibles sont considérables : 2,5 milliards de francs dans le seul bassin de la Seine. Par ailleurs, les travaux de décontamination des eaux souterraines peuvent atteindre 100 millions de francs, mais c'est probablement la perte de ressources de bonne qualité, à l'échelle de plusieurs générations, qui est le plus grave et inestimable pour le patrimoine national. D'ores et déjà, on doit s'éloigner toujours plus des agglomérations et rechercher des nappes bien protégées contre les pollutions diffuses, pour trouver de l'eau en quantité et qualité satisfaisante et l'on parle déjà, dans certaines régions, de champs captants irremplaçables.

#### 5. MOYENS DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION

La pollution des eaux souterraines n'est pas une fatalité ! De nombreux moyens préventifs d'ordre réglementaires, techniques, financiers, relayés par l'information sont à la disposition des gestionnaires pour lutter contre les causes de pollutions. Ainsi la première loi sur l'eau de 1964 a harmonisé de nombreuses dispositions législatives et introduit des notions de gestion quantitative et qualitative intégrée, de seuils de rejets, et d'incitations financières. Des réglementations sectorielles relatives à la santé, aux établissements classés, aux déchets, à l'urbanisation, aux mines et carrières permettent de contribuer à la protection des eaux souterraines. Le code de la Santé publique permettait la protection renforcée des zones de captages postérieurs à 1967 par des périmètres de protection. La nouvelle loi sur l'eau de 1992 renforce la protection régle-

mentaire en rendant obligatoire la déclaration et la mesure des rejets polluants, les périmètres de protection pour tous les captages publics et prévoit la création de «zones de sauvegarde» pour les usages futurs, et des schémas d'aménagement et de gestion des eaux pouvant prendre en compte des objectifs de qualité.

Le ministère de l'Environnement, responsable de la gestion des eaux souterraines, délègue l'exercice de police aux services décentralisés des ministères de l'Agriculture, de l'Équipement et de l'Industrie. Ceux-ci peuvent s'appuyer sur de nombreux moyens : techniques modernes de stockage et de confinement des déchets et produits polluants et mise en oeuvre de meilleures pratiques culturales qui, comme l'ont démontré plusieurs expérimentations, permettent la réduction des pertes d'azote dans le sous-sol de 20 kg à l'hectare, et l'abaissement de 30 % les teneurs dans les eaux souterraines ; méthodes de diagnostic et d'échantillonnage des polluants dans les sols et les nappes et de hiérarchisation des risques de pollution ; réseaux de contrôle d'évolution de la qualité des eaux souterraines ; modèles hydrodynamiques et hydrochimiques de prévision des trajectoires et concentrations des pollutions depuis les zones à risques.

Par ailleurs, le système de redevances et d'aides financières des agences de l'eau, et des collectivités locales, permet à la fois de dissuader les pollueurs et d'aider à la prévention et à la décontamination des pollutions : achat de terrain, indemnisation des servitudes et travaux de mise en conformité dans les périmètres de protection, création de réserves foncières pour les futures zones de prélèvements, modification de pratiques culturales.

En outre, les moyens informatifs jouent un rôle essentiel par l'information préalable sur les enjeux et les solutions possibles. Il faut citer, à cet effet, l'action exemplaire du CORPEN depuis 1985 dans le milieu agricole pour assurer la promotion des études, des méthodes et des recherches pour des pratiques culturales moins polluantes pour les eaux souterraines. Alors qu'elle ne s'attachait qu'aux produits azotés, depuis 1992 son action est étendue aux produits phyto-sanitaires. Le rôle permanent d'information des agences de l'eau depuis un quart de siècle mérite également d'être souligné. Les effets positifs de ces mesures sont déjà perceptibles (Figure 9).

La gestion en commun des eaux souterraines est parfaitement réalisable comme l'ont montré les initiatives pour la protection de la nappe de l'Astien (Languedoc) et de la plaine d'Alsace où un «contrat de nappe», le premier en France, a été signé en 1990 entre la région, ses deux départements et l'Agence de l'eau, pour définir les modalités d'une meilleure gestion de l'eau. Ces concertations devraient désormais se développer dans le cadre réglementaire des SAGE.

Sur le plan curatif, plusieurs méthodes de décontamination, physiques, chimiques et biologiques peuvent être mises en oeuvre selon les cas. L'une des plus utilisée est le piège hydraulique laquelle, en créant une dépression par pompage dans des forages judicieusement implantés permet d'attirer et de récupérer l'eau contaminée par des substances solubles, ou les hydrocarbures flottants (Figures 10 et 11). C'est à l'aide d'une quarantaine de ces dispositifs que l'on réduit la pollution de la nappe phréatique du Rhin, en Alsace, en extrayant chaque année 165 000 t de chlorures de

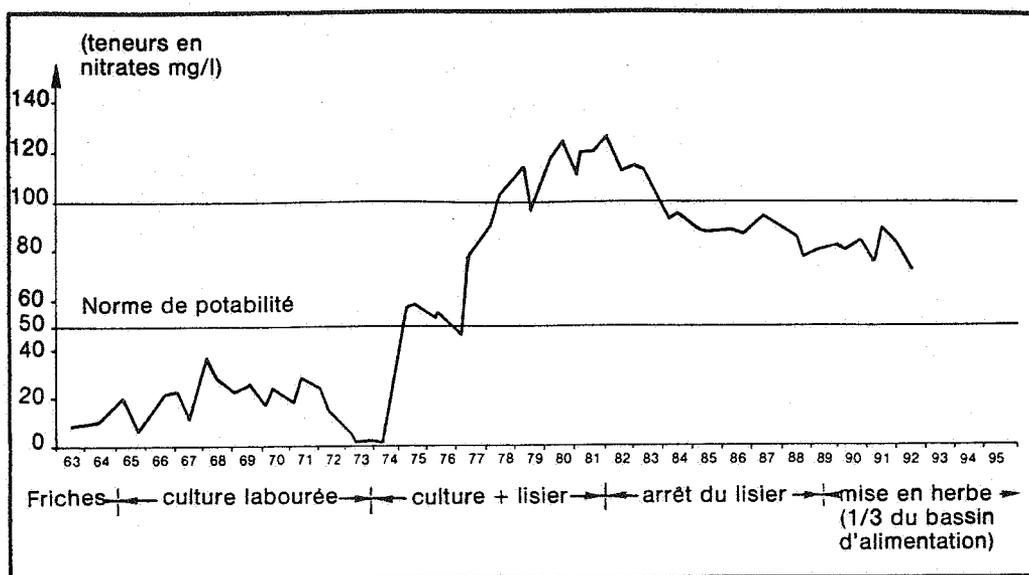
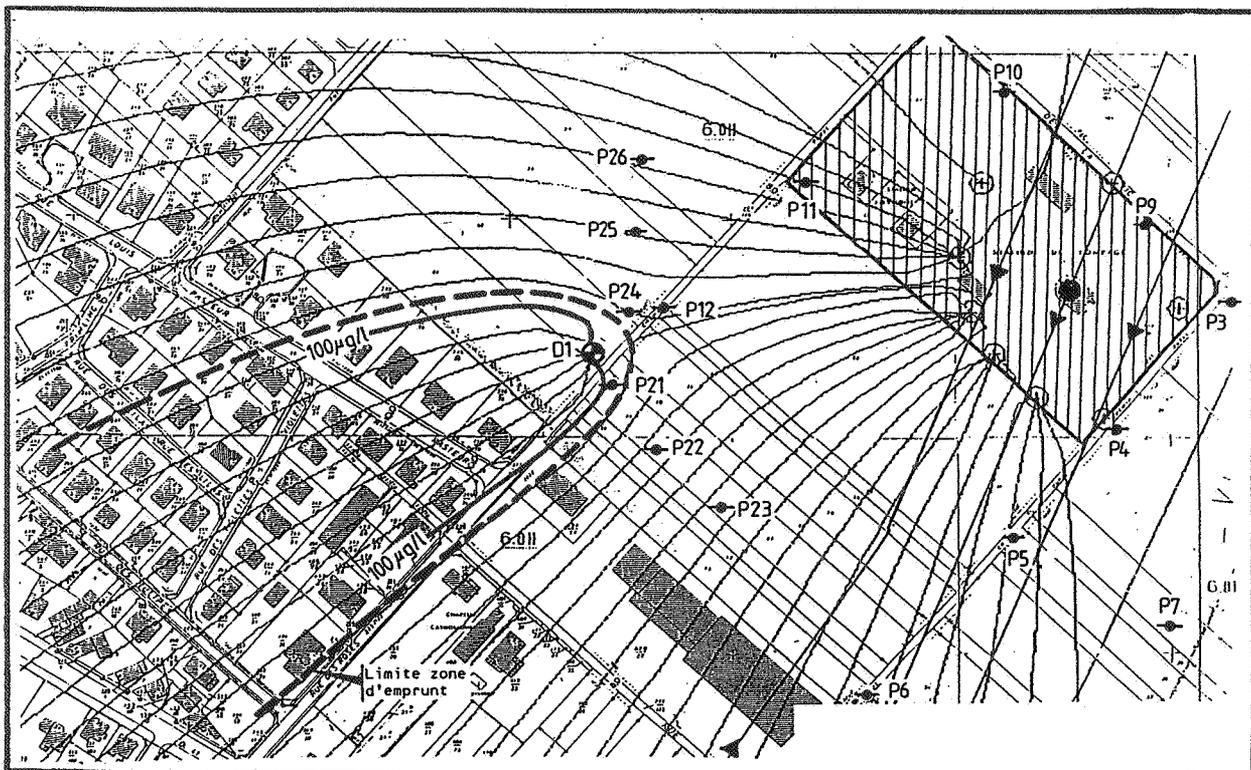


Figure 9. Exemple de l'influence des pratiques agricoles sur la teneur en nitrates des eaux souterraines ; source de Liocourt (57) - nappe du Dogger (Agence de l'Eau Rhin-Meuse).

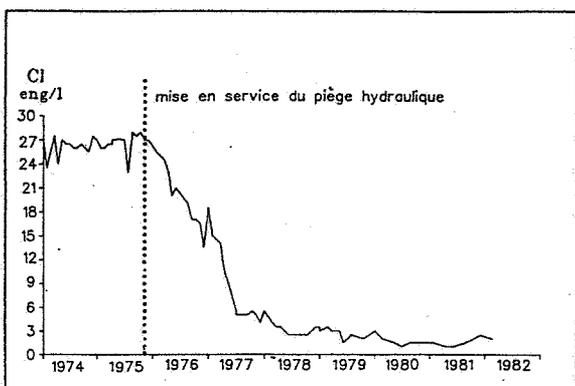


**Figure 10.** Tracé des lignes de courant pendant un pompage de dépollution - nappe de la plaine d'Alsace, environs de Strasbourg - BRGM 1991.

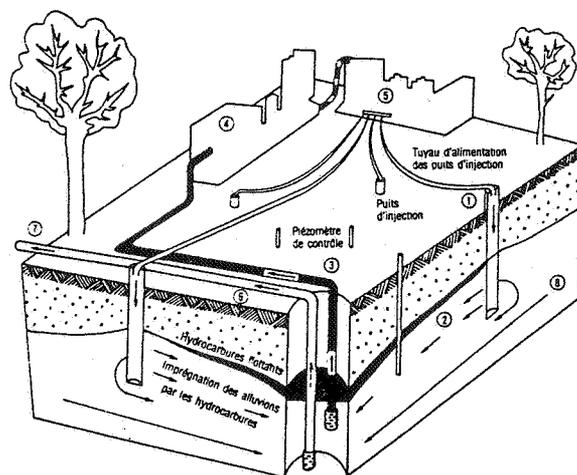
sodium. Lorsqu'une intervention est décidée et mise en oeuvre très rapidement, il est possible d'obtenir un résultat spectaculaire vis-à-vis d'une pollution bien localisée, comme ce fut le cas près de Strasbourg en 1990 où l'on a résorbé une contamination par du tétrachloro-éthylène en 4 mois de pompage.

Les traitements dans l'aquifère commencent à faire leur apparition en France. La biodégradation in situ, par ensemencement de bactéries et dopage du milieu en éléments nutritifs et en oxygène, permet une dégradation de 50 % des hydrocarbures piégés dans les terrains (Fi-

gures 12 et 13). La première opération en vraie grandeur est en cours près de Strasbourg, pour décontaminer l'aquifère sous une ancienne raffinerie. On peut aussi utiliser le stripping, par insufflation d'air dans le sous-sol, ou le venting, par aspiration, procédés performants pour extraire les produits volatils comme l'a démontré



**Figure 11.** Résultat de la mise en oeuvre d'un piège hydraulique dans une nappe polluée par des chlorures - Plaine du Doubs - BRGM.



**Figure 12.** Dispositif de traitement in situ d'une nappe polluée par des hydrocarbures, par biodégradation accélérée - BRGM-ESYS.

1. Injection d'eau et de nutriments.
2. Dégradation des hydrocarbures par les bactéries.
3. Pompage de l'eau traitée.
4. Décantation et filtration.
5. Ajout de nutriments et d'eau oxygénée.
6. Pompage d'eau de nappe (piège hydraulique).
7. Evacuation hors site.
8. Ecoulement des eaux souterraines.

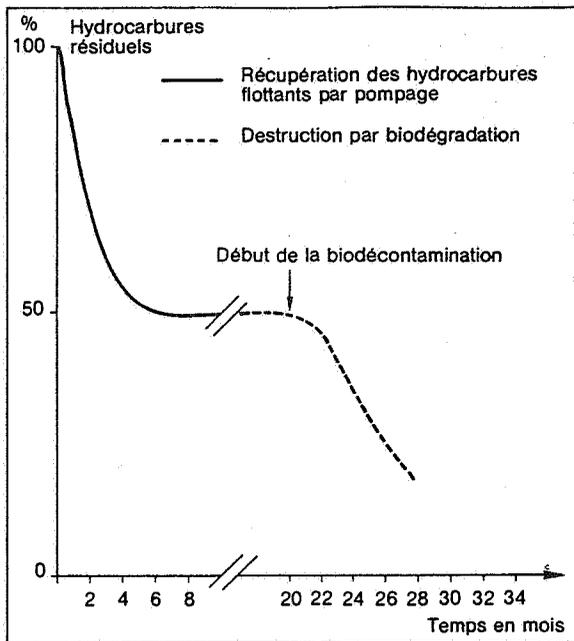


Figure 13. Résultats des travaux de décontamination des hydrocarbures au Port-aux-Pétroles de Strasbourg - BRGM-ESYS.

l'opération de décontamination du supercarburant dans la vallée du Rhône réussie à 99 % en un an.

Pendant, l'efficacité des interventions directes sur les nappes est encore très discutable : longues mais réalisables en ce qui concerne les polluants miscibles, elles sont difficiles et aléatoires pour les polluants non solubles. Il est souvent nécessaire de combiner différentes méthodes. Les expériences connues montrent qu'il est difficile et coûteux de réussir la réhabilitation d'une nappe contaminée quels que soient les polluants concernés et, en tout état de cause, de la rendre à nouveau potabilisable. C'est donc bien en toute priorité au niveau de la prévention vis-à-vis des sources de risques, qu'il faut porter les efforts.

## 6. PERSPECTIVES D'UTILISATION DURABLE POUR LA CONSOMMATION HUMAINE

On est certain qu'en France, le risque de pénurie en eau souterraine ne viendra pas de la quantité, les ressources des grands aquifères étant inépuisables de mémoire d'homme. D'ailleurs, malgré l'abaissement progressif du niveau des nappes lors de l'absence de recharge durant les années 1989 à 1992, les régions dotées d'aquifères ont été favorisées par rapport à celles dépourvues d'eau souterraine, elles n'ont pas connu de réel problème de restriction et leurs rivières, à quelques rares exceptions, ont toujours coulé. Certes il existe des aquifères moins capacitifs que d'autres et des secteurs très localisés où les eaux souterraines sont

surexploitées, mais la réglementation des prélèvements, et une meilleure répartition de ceux-ci, dans l'espace et entre usagers, d'ailleurs renforcées par la loi sur l'eau de 1992, devraient permettre une gestion équilibrée de la ressource et éviter une répercussion sur le débit des cours d'eau. Car ce n'est pas l'eau que l'on consomme, celle-ci étant restituée au milieu naturel, mais bien sa pureté.

Or compte tenu du bilan assez pessimiste de la qualité des eaux souterraines et des tendances d'évolution on peut se poser la question sur leurs perspectives d'utilisation à long terme pour l'alimentation en eau potable.

En effet, c'est bien au niveau de la qualité que l'on peut avoir les plus grandes craintes de pénurie pour l'avenir car malgré leur protection apparente les eaux souterraines sont fragiles, les temps de propagation des polluants peuvent être très longs et se compter en plusieurs dizaines d'années et lorsque les pollutions atteignent les nappes, elles sont pernicieuses et persistantes. Il est malheureusement certain que le bilan n'est que provisoire, que le taux de nitrate dans les aquifères homogènes continuera à croître dans des proportions difficiles à chiffrer, et que de nombreuses « pollutions historiques » seront encore découvertes, avec des impacts économiques et écologiques désastreux, tant sur des captages que sur des exutoires naturels. Malgré l'amélioration des techniques de décontamination, celles-ci sont encore délicates, onéreuses et longues à mettre en oeuvre pour des résultats qui ne sont jamais absolus. Même les procédés de potabilisation de l'eau distribuée peuvent conduire à l'apparition de produits secondaires dont la toxicité est encore mal connue.

Devant la situation actuelle, héritage d'un siècle de développement démographique, d'urbanisation et d'industrialisation anarchique, il est temps de faire la « part de la pollution » et d'entamer la reconquête de la qualité des eaux souterraines.

En fait, tout d'abord il existe encore, fort heureusement de grandes parties d'aquifères mieux protégés des pollutions de surface loin des zones urbaines et industrielles, à l'amont des bassins ou dans des secteurs forestiers où l'eau souterraine est encore de bonne qualité, tous les éléments étant très inférieurs aux normes de potabilité et la croissance des teneurs en nitrates reste faible. Les nappes captives en sont le meilleur exemple. Dans tous ces aquifères l'eau souterraine est naturellement potable.

Dans certaines conditions les nappes peuvent être l'objet de phénomènes de dénitrification naturelle. Les hydrogéologues disposent des moyens et des compétences pour les identifier et préconiser leur mode d'exploitation.

Ensuite, comme pour notre santé, mieux vaut prévenir que guérir, c'est-à-dire promouvoir et renforcer une politique nationale de prévention de la qualité de l'eau dans son gisement, car la cause de toute pollution est toujours humaine.

Il est certain que sous, et à la périphérie des agglomérations et tissus industriels et miniers, la situation est souvent désespérée, tant les nappes sont polluées par plusieurs dizaines de sortes de produits chimiques. La seule action possible est de les circonscrire, puis si possible supprimer les sources de pollution si cela est techniquement et financièrement réalisable. Mais heureusement cela ne représente qu'une faible fraction du territoire national.

De nombreux instruments réglementaires ont été mis en place depuis une quinzaine d'années. Sans cesse renforcés ils permettent d'éviter les pollutions d'origine industrielle et domestique : Interdiction de rejets dans les eaux souterraines, Études d'impact, réglementation des établissements classés, des stockages de déchets industriels et ménagers, résorption d'anciennes décharges, audits d'environnement. Pour la majeure partie des aquifères, la dégradation de la qualité est essentiellement liée aux nitrates et aux produits phyto-sanitaires. On peut fonder de grands espoirs sur la mise en oeuvre d'une politique de pratiques culturelles plus économes d'azote et de pesticides, déjà bien amorcée par les ministères concernés et la profession, sous l'incitation du comité d'orientation pour la réduction des eaux par les nitrates et les phosphates d'origine agricole, dont l'objectif est de faire évoluer les comportements de l'ensemble des agriculteurs français, afin de réduire les risques de pollution par les nitrates. Ce comité s'attaque désormais également aux problèmes posés par les produits phytosanitaires.

L'application de la Directive nitrates : contrôle des aquifères fortement contaminés, réduction des épandages, et la mise en jachère de 20 % des terres agricoles, devrait conduire à une réduction d'azote dans les eaux souterraines, mais le renversement des tendances sera long surtout pour les aquifères à grande inertie. Des inversions ayant été démontrées pour des aquifères moins capacitifs, ces mesures préventives devront être hiérarchisées en fonction du « temps de retour » prévisible.

Par ailleurs, il est primordial d'accélérer les procédures de mise en place de périmètres de protection efficaces autour des captages destinés à la consommation humaine, car si le traitement des eaux ou l'abandon de forages et le raccordement à une autre ressource est une solution de facilité, elle masque les vrais problèmes, c'est fuir devant la pollution et non la juguler. Parallèlement, il est nécessaire, de déterminer sur l'ensemble du territoire, les parties d'aquifères d'intérêt

économique stratégique par leur ressource quantitative et qualitative, leur moindre vulnérabilité, et de les protéger pour le long terme.

La nouvelle loi sur l'eau qui prévoit des schémas d'aménagement des eaux, des zones de sauvegarde et l'obligation de périmètres de protection pour tous les captages dans un délai de cinq ans doit permettre d'atteindre ces objectifs.

En conclusion, la conjonction des connaissances scientifiques et techniques et de l'arsenal réglementaire, qu'il conviendra d'améliorer et de renforcer, s'ils sont convenablement utilisés et relayés par la formation et l'information sur toutes leurs formes, doit permettre d'être raisonnablement optimiste pour l'avenir. Désormais les hommes d'aujourd'hui et de demain ont les moyens, s'ils en ont la volonté et à cette condition essentielle, de conserver voire accroître le rôle primordial économique et sanitaire des eaux souterraines que leur confère leur garantie de ressource et leur bonne qualité naturelle avec vraisemblablement une meilleure garantie de cette qualité.

Si nous voulons que les générations futures connaissent encore la notion d'eau pure, et non uniquement d'eau rendue potable par traitement, cela ne peut se concevoir, à l'exception des nappes captives, que par le civisme des citoyens et un refus total du fait polluant.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- BODELLE, J. & MARGAT, J., 1980. L'eau souterraine en France. Masson, Paris.
- GUILLEMIN, C. & ROUX, J.C., 1992. Pollution des eaux souterraines en France. Manuels et méthodes, n°23. Editions du BRGM, Orléans (réédition, complétée, du rapport n° 29 de l'Académie des Sciences, 259 p., 71 fig.).
- ROUX, J.C. & LALLEMAND-BARRÈS, A., 1989. Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Manuels et méthodes n° 19, Editions du BRGM, Orléans.
- ROUX, J.C., 1990. La protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine en France. Aspects réglementaires, techniques et socio-économiques. Journées italo-franco-suissees. Fribourg, 4-6 octobre 1990.
- ROUX J.C., 1992. La gestion, en France, de la protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation publique en eau potable. Journées de l'Association nationale des services d'eau de Belgique, Liège 11-12 juin 1992.

Manuscrit reçu le 27 février 1994 et accepté pour publication le 17 mai 1994.