PROTECTION DES NAPPES SOUTERRAINES : CONTROLE DE LA NAPPE PHRÉATIQUE RHÉNANE. MOYENS DE LUTTE CONTRE SA POLLUTION

par L.-A. SACKMANN

Professeur à l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg
Directeur de l'Institut de Mécanique des Fluides

1. — La nappe phréatique de la plaine rhénane, son cadre géologique, ses caractéristiques hydrologiques et son importance économique

1.1 Survol de la plaine rhénane.

La nappe phréatique de la plaine rhénane, la plus riche d'Europe, partagée par la France et l'Allemagne, mérite et réclame que l'on se penche d'abord sur ses origines, sa capacité et son exploitation,

- pour comprendre l'exceptionnelle richesse naturelle dont nous disposons,
- pour accepter la contrainte de mesures de protection d'extrême urgence.

La France géographique est partagée en grands bassins fluviaux, régis par le cadre administratif des Agences financières de Bassin (fig. 1).

L'étendue et la nature hydrologique de ces bassins est représentée dans la très belle carte hydrogéologique éditée par le B.R.G.M. (fig. 2).

La plaine rhénane, au sommet nord-est de l'hexagone, n'y figure que par son quart sud-ouest, troisième quadrant d'une aire géométrique dont le premier au nord-est, le second au nord-ouest et le quatrième au sud-est font partie de l'Allemagne, l'axe géographique nord-sud étant formé par le Rhin.

L'aspect géologique de la plaine rhénane avec sa nappe phréatique apparaît très nettement dans la magnifique carte

en relief dressée à l'Institut de Géologie de l'Université de Strasbourg avant la guerre (fig. 3).

Nous survolons ici cette plaine de 300 km de long entre Bâle et Bingen, d'environ 30 km de large entre les Vosges et la Forêt-Noire et les massifs montagneux qui les prolongent au nord. Nous nous permettons de donner quelques rappels géologiques indispensables pour mettre en évidence le caractère exceptionnel de la nappe phréatique rhénane, aussi bien en ce qui concerne sa morphologie d'ensemble, qu'en ce qui a trait à la richesse fantastique, mais fragile, de son aquifère.

1.2 Mécanisme tectonique du fossé rhénan.

Alors que les bassins des grands fleuves d'Europe, et du monde, sont généralement formés de plaines alluviales dont l'aquifère perméable est issu de l'érosion des massifs montagneux environnants, la plaine du cours moyen du Rhin, entre Bâle et Bingen, doit son existence à des phénomènes tectoniques préalables et d'ampleur considérable qui ont affecté la planète dès la fin de l'époque secondaire pour conduire à la mise en place des grands massifs alpins.

En effet, la plaine rhénane résulte de l'effondrement du vieux môle hercynien Vosges - Forêt-Noire avec son manteau de dépôts marins, puisque pendant la plus grande partie de l'époque secondaire le massif primaire avait été submergé par la mer :

a) *Au début de l'ère tertiaire*, il y a environ 45 millions d'années, sous l'effet de la poussée alpine, on assiste à l'effondrement progressif de la clef de voûte du môle; la mer occupe alors le fossé en voie de formation et y dépose

1/ Les grands bassins français.

2/
Carte
des nappes d'eau souterraine
de la France.

3/ Le fossé rhénan.

de nouveaux sédiments; le lent mouvement d'affaissement de cette bande de l'écorce terrestre, sous l'énorme poids des dépôts sédimentaires, est accompagné par compensation du relèvement de ses bords pour donner naissance aux chaînes de montagnes parallèles que nous connaissons aujourd'hui.

b) *A la fin de l'ère tertiaire*, et à la faveur des dernières manifestations de la poussée alpine, le cours du Rhin, alors dirigé vers la Méditerranée est définitivement orienté vers la mer du Nord par son entrée dans le fossé.

c) *Avec l'âge quaternaire* on assiste à l'alluvionnement du fossé rhénan conduisant à la formation de son aquifère exceptionnel.

1.3 Caractéristiques hydrologiques de la plaine rhénane.

Aspects géologiques. — La structure actuelle du fossé rhénan, exemple typique de « Graben », comporte donc à la base le vieux socle d'âge primaire constitué de roches cristallines. Ce socle est recouvert de terrains sédimentaires secondaires et tertiaires dont l'épaisseur peut dépasser 3 000 m.

Pratiquement imperméables, ces terrains supportent les alluvions quaternaires qui constituent l'essentiel de l'aquifère de la plaine rhénane. Ce dernier, mélange de galets, de gravier et de sable, de grande porosité, est loin d'avoir une épaisseur constante, puisqu'il s'appuie sur un substratum imperméable dont le toit est très tourmenté. (Notons que c'est dans les terrains d'origine tertiaire que se trouvent les gisements de potasse dans le Haut-Rhin et les gisements de pétrole dans le Bas-Rhin).

Aspects hydrostatiques. — La profondeur ou toit de la nappe se situe en général à quelques mètres du sol; la nappe peut apparaître en surface (région de Colmar) comme elle peut se trouver à une profondeur de 15 m (région de la Hardt). L'épaisseur ou puissance de la nappe est considérable puisqu'elle est de l'ordre de 100 m; deux grands bassins souterrains caractérisent cette nappe, l'un en France, dans le Haut-Rhin, avec sa puissance de plus de 200 m, l'autre en Allemagne, en Rhénanie-Palatinat, avec une puissance dépassant 500 m.

Aspects hydrodynamiques. — L'énorme masse d'eau que recèle le réservoir souterrain est en mouvement, du sud au nord pratiquement, avec une pente voisine de 1/1 000 à l'entrée au sud et une pente voisine de 1/10 000 à la sortie au nord, la vitesse moyenne étant de l'ordre de 10 m par jour.

Aspects économiques. — La superficie totale de l'aquifère rhénan peut être évaluée à environ 10 000 km² alors que sa capacité est de l'ordre de 100 km³ soit 100 milliards de m³.

Notons, pour mémoire, que l'eau prélevée dans la nappe représente environ 80 % de la consommation totale (domestique, agricole et industrielle) de la plaine rhénane.

2. — Risques et faits de détérioration de la qualité des eaux souterraines, aspects chimiques statiques et aspects physiques dynamiques de la pollution

2.1 Les eaux souterraines et leur pollution.

Nous venons de mettre en évidence l'origine et la structure hydrogéologique de l'immense réserve en eaux souterraines de la plaine rhénane. Or, depuis une dizaine d'années déjà, cette réserve d'eau exceptionnelle du continent court des risques de plus en plus prononcés de pollution. Il est urgent que l'on se penche sur l'examen de ces risques, et par voie de conséquence, sur les mesures de protection de cette réserve naturelle.

Il faut noter, avec une satisfaction relative, que l'on commence quand même à s'inquiéter des menaces de toutes sortes qui planent sur notre environnement, et tout particulièrement sur l'élément vital de l'eau. Malheureusement, les eaux souterraines, dans leur obscurité et dans leur silence, sont loin d'avoir la vedette des rivières à truites et des fleuves à égouts. Echappant à l'observation directe, la pollution ne saurait être contrôlée indirectement qu'avec un retard considérable, souvent irréparable, ce qui met en lumière les conséquences graves qui peuvent en résulter du point de vue de la conservation de nos ressources naturelles.

2.2 Principe mécanique et physique d'une pollution d'eau souterraine.

Les vitesses d'écoulement de l'eau dans la nappe souterraine sont de l'ordre de 0,1 mm/s. Dans un tel milieu poreux, le régime d'écoulement hydrodynamique est pseudolaminaire. Macroscopiquement, la vitesse moyenne de Darcy dérive d'un potentiel alors que microscopiquement, les filets fluides interstitiels subissent une dispersion progressive.

De plus, une nappe souterraine libre, coiffée de la frange

capillaire, est en communication directement avec l'atmosphère par l'intermédiaire d'une couverture perméable d'épaisseur variable s'étendant jusqu'à la surface du sol (zone d'aération plus ou moins saturée d'eau pelliculaire).

En conséquence, deux caractères, mécanique et physique, marquent le comportement d'une eau souterraine en mouvement :

- le caractère interne mécanique du mouvement laminaire ordonné;
- le caractère externe physique de la frange capillaire surmontante.

Ces caractères déterminent et expliquent les différents processus de la pollution d'une eau souterraine, en fonction des conditions dans lesquelles une substance chimique étrangère pénètre directement ou indirectement dans la nappe pour la polluer.

Nous ne nous occupons pas, dans cette communication, de l'aspect purement chimique de la pollution, à savoir la définition de la toxicité et l'analyse quantitative des substances étrangères dissoutes accidentellement dans la nappe (rappelons cependant que certains corps solubles dans l'eau en modifient la saveur et l'odeur pour la rendre impropre à la consommation avec des seuils de sensibilité de l'ordre de 10^{-9}).

Mais nous décrivons, qualitativement, des faits précis de pollution, dans l'optique conceptuelle de la mécanique des fluides et de la physique des liquides, à savoir, la naissance et l'évolution dans l'espace et dans le temps de la pollution d'une eau souterraine.

2.3 Causes de détérioration de la qualité d'une eau souterraine.

On peut dire que chaque cas de pollution constitue un cas d'espèce. Cependant, l'ensemble des cas possibles peut être scindé en deux sous-ensembles caractéristiques et groupant respectivement :

- les pollutions directes et immédiates de l'eau souterraine par pénétration temporaire ou continue dans la nappe saine de substances chimiques étrangères;
- les pollutions indirectes et différées de l'eau souterraine par échange spontané ou provoqué entre un aquifère sain et un milieu contaminé.

Pollution directe de l'eau. — L'introduction du polluant peut être :

- interne, si elle s'effectue au sein même de l'aquifère, comme c'est le cas de produits solubles légers issus de la fuite d'un oléoduc (fig. 4);
- externe, si elle émane de l'infiltration à partir du sol, comme c'est le cas de l'enfouissement de saumures lourdes de chlorure de sodium (fig. 5).

On peut classer comme suit les cas de pollution hélas trop fréquents :

- pollution urbaine (eaux usées, ordures ménagères, détergents...);
- pollution agricole (engrais, pesticides, herbicides...);
- pollution industrielle (mines, raffineries, papeteries...).

Pollution indirecte de l'eau. — L'introduction du polluant s'effectue par échange plus ou moins différé, spontané ou provoqué, avec une eau superficielle en mouvement ou au repos, mais qui a été contaminée antérieurement. L'échange entre l'aquifère sain et le milieu pollué se fera par l'établissement d'un flux hydrodynamique interne entre les deux domaines sous l'effet de leur dénivellation piézométrique.

On peut classer ici des cas de pollution également très fréquents :

- pollution naturelle (rivière perchée et contaminée alimentant la nappe);
- pollution artificielle (barrages, canaux d'irrigation et de navigation);
- pollution différée (puits mal entretenus, gravières polluées).

3. — Moyens de surveillance, de recherche et d'intervention qui existent en potentialité en Alsace pour protéger la nappe phréatique rhénane

3.1 Activités pluridisciplinaires et concentrations des moyens.

Ces moyens de surveillance, de recherche et d'intervention concernent respectivement :

a) *Le Service de la Carte Géologique d'Alsace-Lorraine*, dont le rôle essentiel consiste dans la surveillance et le contrôle permanent de la nappe phréatique rhénane, en se limitant évidemment à la zone française des deux départements du Haut-Rhin et du Bas-Rhin.

b) *L'Institut de Mécanique des Fluides de Strasbourg*, dont l'optique spécifique est la recherche des aspects dynamiques de la pollution, modulant les analyses chimiques statiques, mais permettant aussi d'envisager des actions de lutte par neutralisation mécanique.

c) *Le Service de la Protection Civile du Bas-Rhin*, dont la mission fondamentale est de procéder à l'intervention immédiate, en cas de sinistre et de risque de pollution de la nappe phréatique, par des moyens puissants d'équipement et de décontamination.

Nous mentionnons avec plaisir que ces trois organismes officiels, apparemment très distincts par leur cadre administratif, se sont groupés dans une commission permanente, sous l'égide de M. le préfet de Région et préfet du Bas-Rhin.

3.2 Orientation et activités du Service de la Carte géologique d'Alsace-Lorraine.

Les orientations s'exercent dans le domaine de la géologie, de l'hydrologie et de la chimie des eaux. Les principaux thèmes concernent :

- *l'hydrodynamique* avec l'optimisation des informations recueillies sur le terrain de façon à permettre le contrôle et la gestion de l'aquifère;
- *l'hydrologie de surface* avec la définition des conditions d'écoulement des eaux, en vue de l'utilisation rationnelle du potentiel aquifère;
- *la pollution des eaux*, avec toutes les démarches nécessaires pour appréhender la contamination d'un aquifère alluvionnaire.

Les activités exercées au Service se diversifient comme suit :

- métrologie en vue de fournir des mesures significatives;
- informatique permettant le traitement des données hydrologiques;
- modèles analogiques assurant le contrôle et la gestion des aquifères;

- modèles mathématiques facilitant des études méthodologiques.

L'équipement scientifique et technique très puissant est constitué :

- au laboratoire par des moyens variés de mesure, d'analyse chimique et de calcul sur ordinateur;
- sur le terrain par un réseau d'observations de plus de 500 stations de contrôle avec personnel, appareillage et parc automobile.

3.3 Orientations et activités de l'Institut de Mécanique des Fluides de Strasbourg.

Les orientations de recherche, entreprises au Laboratoire spécialisé d'hydrodynamique des milieux poreux, sont à la fois théoriques et expérimentales, fondamentales et appliquées. Elles ont été inspirées, dans le domaine d'actualité de la pollution des eaux souterraines, par deux importantes études d'application, qui ont été confiées à l'Institut en 1961 et en 1963 et qui visaient précisément la nappe phréatique rhénane :

4/ Fuite de pétrole avec sillage polluant de produits solubles.

6/ Flûte de Pan en fonctionnement simulé de neutralisation.

5/ Enfouissement et dispersion de saumures lourdes.

7/ Flûte de Pan après fonctionnement réel dans un modèle réduit.

a) Pollution par les hydrocarbures : l'étude portait sur la propagation et la neutralisation hydrodynamique des fuites éventuelles d'un oléoduc (fig. 6 et 7).

b) Pollution par des saumures : l'étude portait sur l'enfouissement et la dispersion de produits chimiques lourds dans une nappe libre.

Les activités de recherche, exercées au Laboratoire, se classent en :

- études méthodologiques avec mesure des vitesses et des débits, dispersion d'une solution légère et enfouissement d'une solution lourde, examen des lois de similitude et des structures alluvionnaires;
- essais systématiques concernant principalement la pollution directe et immédiate ou indirecte et différée d'un aquifère.

L'équipement scientifique et technique se partage comme suit :

- au Laboratoire, par des modèles pétrophysiques mono-bi-tridimensionnels avec les dispositifs qualitatifs de visualisation et quantitatifs de mesure;
- sur le terrain, par un centre d'essai dans l'enceinte de la station élévatoire des eaux de la Communauté Urbaine de Strasbourg.

3.4 Orientation et activités du Service de la Protection Civile du Bas-Rhin.

Les orientations du service préfectoral englobent évidemment, et malheureusement au tout premier rang, l'intervention immédiate et efficace en cas de pollution de la nappe phréatique, dans le cadre du Département du Bas-Rhin.

Les activités spécifiques et l'équipement technique peuvent être décrits et mis en lumière grâce à l'exemple typique du renversement d'un camion de gas-oil sur un terrain d'alluvions sableuses offrant des conditions hydrogéologiques particulières de perméabilité et de transmissivité.

L'intervention sur le terrain consiste dans :

- la reconnaissance et la délimitation de la zone contaminée;
- l'examen de l'enfouissement et de l'étalement du produit polluant;
- l'étude de l'évolution de la pollution en fonction du temps.

Les moyens de décontamination perfectionnés comprennent :

- l'extraction directe par pompage ou le refoulement indirect par piézomètre;
- la récupération éventuelle par des puisards ou une excavation;
- la destruction du produit par le feu grâce à des fours mobiles spéciaux.

Bibliographie.

- MILLOT, SIMLER et GENDRIN. — Etude de la nappe phréatique de la plaine du Haut-Rhin. Mémoire n° 15 du S.C.G.A.L., Strasbourg (1957).
- DUCHE. — L'histoire du monde : l'animal debout. Flammarion, Paris (1958).
- ROTHER, SAUER and SIMLER. — The Rheingraben Progress Report 1967. I.U.M.P., A.G.L.B.W., S.C.G.A.L., Fribourg (1967).
- ILLIES. — Graben tectonics as related to crust-mantle-interaction. Graben Problems, I.U.M.P., Report, n° 27, p. 4-27, Stuttgart (1970).
- DOEBL. — Die tertiären und quaternären Sedimente des südlichen Rheingrabens. Graben Problems, I.U.M.P. Report, n° 27, p. 56-66, Stuttgart (1970).
- SIMLER et THÉOBALD. — Les alluvions plioquaternaires du fossé rhénan (secteur plaine d'Alsace). Graben Problems, I.U.M.P. Report, n° 27, p. 75-78, Stuttgart (1970).
- Risques de pollution d'un gisement aquifère par un pipe-line, Note de la S.P.L.S.E., Paris (1960).
- SACKMANN. — Dispositif de détection et de neutralisation hydrodynamique de substances solubles étrangères dans les alluvions aquifères. Brevet n° 7757, Strasbourg-Paris (1963).
- SACKMANN et ZILLIOX. — Pollution et protection des nappes d'eau souterraines. T.S.M., n° 6, Saint-Malo - Paris (1963).
- SACKMANN. — Pollution des eaux souterraines. Surveillance et protection. Conférence-rapport, revue l'Eau, n° 6, p. 303, Paris (1965).
- MARGAT et ALBINET. — Pollution des eaux souterraines par les eaux de surface. Rapport B.R.G.M., Paris (1965).
- SCHWILLE. — Die Kontamination des Untergrundes durch Mineralöl. D.G.M., J. 10, H. 10, p. 194-207, Coblenz (1966).
- SACKMANN et SAUBOIN. — Protection et captages d'eau souterraine : principes généraux. La Technique de l'eau, n° 243, p. 21, Bruxelles (1967).
- SACKMANN et SAUBOIN. — Protection et captages d'eau souterraine : protection des pipe-lines. La Technique de l'eau, n° 243, p. 45, Bruxelles (1967).
- VAN DAM. — Die Ausbreitung von Mineralöl in grundwasserführenden Schichten. D.G.M., J. 11, H. 1, p. 15-28, Coblenz (1967).
- SACKMANN. — Hydrogéologie et mécanique des fluides. Bull. B.R.G.M., III, p. 1-5, Paris (1968).
- DRACOS. — Uebelik und Ergebnisse von Modellversuchen. S.V.G.L., J. 25, n° 3, p. 109-116, Zurich (1968).
- ZILLIOX. — Etude physique des écoulements de liquides miscibles en milieu poreux. Application à la pollution des eaux souterraines. Thèse doctorat d'Etat, I.M.F.S., résumé, La Houille Blanche, n° 6, Grenoble (1969).
- Pollution des eaux et hydrologie. — SACKMANN. Préface. Nouveaux procédés de mesure en hydrométrie.
- ANDREA. — Traduction française, Dunod, Paris (1970).
- FURON. — Le problème de l'eau dans le monde. Bibliothèque scientifique, Payot, Paris (1963).
- SALVERDA, SEIBERT et LINDENBERGH. — Les eaux douces. Sauvegarde de la nature, Conseil de l'Europe, Strasbourg (1968).
- SMITHERS et HOUSIAUX. — La Charte européenne de l'eau. Proclamation solennelle, Conseil de l'Europe, Strasbourg (1968).
- La lutte contre la pollution des eaux douces. La nappe phréatique de la plaine rhénane. I.M.F.S., exposition sur l'eau. Conseil de l'Europe, Strasbourg (1968).
- Rapports du Comité technique de l'Eau « Alsace ». Service de la Carte géologique d'Alsace et de Lorraine. Commission interministérielle d'étude de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace.

Bibliographie

Abréviations.

- A.G.L.B.W. Abhandlungen des Geolog. Landesamt Baden-Württemberg.
- B.R.G.M. Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- D.G.M. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen.
- I.M.F.S. Institut de Mécanique des Fluides de Strasbourg.
- I.U.M.P. International Upper Mantle Project.
- S.C.G.A.L. Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine.
- S.P.L.S.E. Société du Pipe-Line Sud-Européen.
- S.V.G.L. Schweizerische Vereinigung f. Gewässerschutz-Luft-hygiene.
- T.S.M. Techniques et Sciences Municipales.

Discussion

Président : M. J.-C. SUZANNE

A l'ouverture de la Séance, M. le Président fait connaître que M. le Professeur SACKMANN, bloqué à Strasbourg par la grève des Chemins de fer ne pourra présenter sa communication figurant à l'ordre du jour de cet après-midi. C'est son collaborateur, M. ZILLIOX qui en fera l'exposé.

Dans ces conditions, les deux premières communications de la séance feront l'objet d'une discussion commune. (voir page 728).