

ÉTUDE SUR MODÈLES PHYSIQUES DU MÉCANISME DE LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES PAR LIQUIDES MISCIBLES (SAUMURES) ET NON MISCIBLES (HYDROCARBURES)

par

L. ZILLIOX

Chargé de Recherches
au C.N.R.S.

et

P. MUNTZER

Ingénieur de Recherches
au C.N.R.S.

Institut de Mécanique des Fluides
de l'Université Louis-Pasteur, Strasbourg

Orientation générale des recherches

Le but de l'étude est de dégager au moyen de multiples expériences de laboratoire, les caractéristiques essentielles d'un phénomène réel de pollution des eaux souterraines par infiltration de substances chimiques, solubles ou non dans l'eau. Ces expériences sont effectuées au Laboratoire d'Hydrodynamique des Milieux Poreux de l'Institut de Mécanique des Fluides de Strasbourg, dirigé par le professeur L.-A. Sackmann. Elles ont pour origine le souci de préservation des ressources naturelles en eau de l'Alsace.

Rappelons ici l'existence dans cette région d'une couche superficielle alluviale dont l'épaisseur moyenne se situe autour de 100 m. Elle forme le réservoir d'une nappe phréatique particulièrement riche, fournissant une eau potable de qualité, consommable sans traitement spécial et disponible en grande quantité : sa contenance se chiffre par milliards de m³.

Cette nappe dont le toit se situe à proximité de la surface du sol (quelques mètres) est menacée par les rejets industriels et par tout déversement accidentel de produits chimiques, tant à partir du sol que de conduites et réservoirs enterrés.

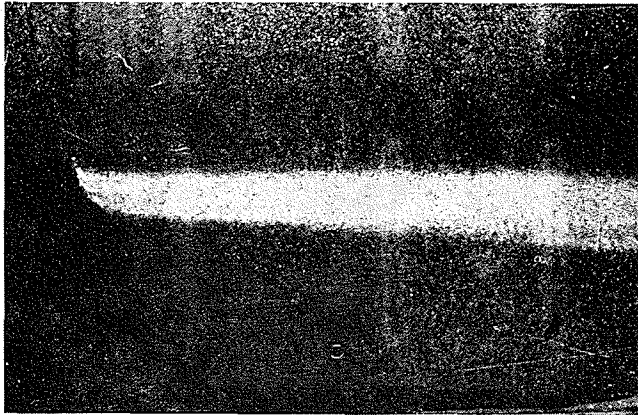
La traversée de l'Alsace par le pipe-line sud-européen a posé le problème d'une éventuelle pollution par les hydrocarbures. L'activité de recherche sur les écoulements de deux liquides non-miscibles en milieu poreux a été

entamée par l'étude de l'infiltration de pétrole brut et de sa migration.

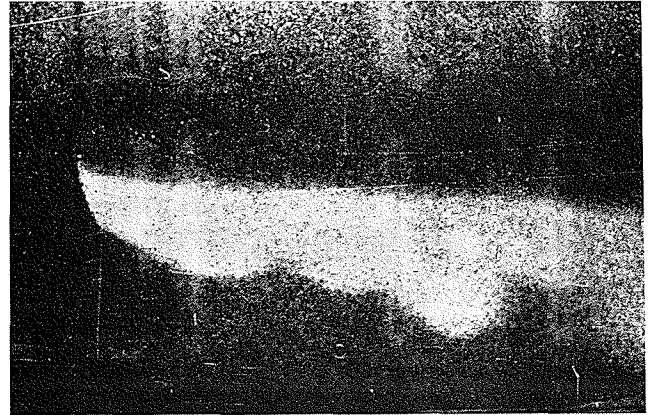
L'existence dans le département du Haut-Rhin d'importants rejets industriels de chlorure de sodium a donné une deuxième orientation à nos études par l'examen du cas de l'écoulement de deux liquides miscibles : la dispersion de ce sel dans l'eau souterraine se traduit par une détérioration des eaux pouvant atteindre les zones de captage.

Les conditions naturelles dans lesquelles se font ces écoulements de deux liquides miscibles ou non-miscibles, sont très complexes. En effet, on connaît assez bien les caractéristiques géologiques de l'aquifère et elles font apparaître d'importantes variations locales de granulométrie. La nappe, par son importance économique, fait l'objet d'études et de surveillances constantes quant à la topographie de son toit, son mouvement et à la qualité de ses eaux. Les données ainsi acquises et les moyens mis en œuvre ne permettent cependant pas d'analyser directement les multiples aspects que peut prendre le phénomène de pollution en fonction des conditions de déversement du produit polluant et des données hydrogéologiques de l'aquifère et hydrodynamiques de l'écoulement souterrain.

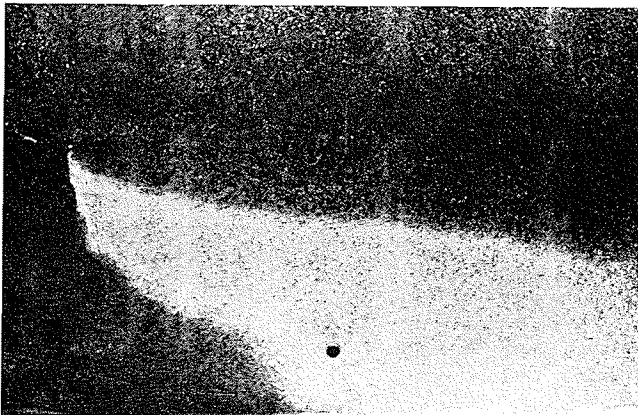
L'utilisation de modèles physiques de laboratoire rend possible l'étude méthodologique nécessaire à la connaissance des paramètres les plus significatifs et de leur influence sur le mécanisme de la pollution étudiée. Le milieu poreux mis en place dans les modèles, bien qu'étant une simplification du terrain naturel, conserve sa structure et de ce fait permet au chercheur d'acquérir l'intuition physique dans l'analyse du phénomène.



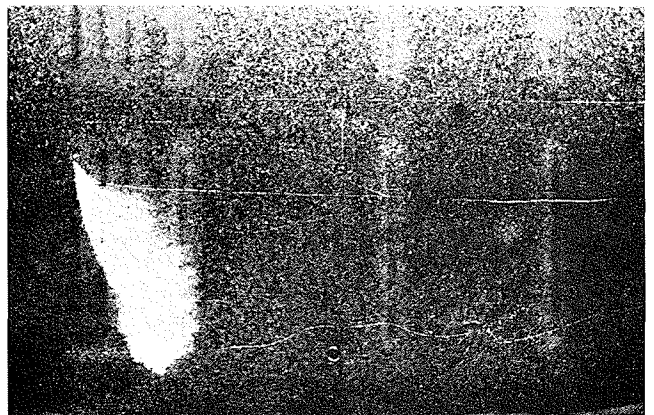
1-1/ *Entraînement* : Zone de mélange stable dans la direction de l'écoulement; influence limitée du contraste de densité.



1-2/ *Régime des instabilités* : développement de poches à l'interface inférieur.



1-3/ *Régime des instabilités* : abaissement progressif de l'interface supérieur.



1-4/ *Enfouissement* : infiltration verticale; contraste de densité prédominant.

1/ Types d'infiltration de saumure dans l'aquifère saturé.

Développement de la zone de mélange lors de l'infiltration de saumure dans une nappe phréatique : étude sur modèles bidimensionnels

Les types d'infiltration (fig. 1).

Dans tous les cas étudiés, le phénomène se présente sous forme d'une source de saumure (fluide secondaire) dans une nappe d'eau souterraine (fluide primaire). Pour la visualisation, la saumure est colorée par adjonction de fluorescéine.

Selon que l'eau circule plus ou moins vite à travers le milieu poreux, selon l'étendue et le débit de la source émettrice de chlorure de sodium en solution et la concentration initiale de cette solution, on distingue :

a) *l'enfouissement*, infiltration verticale d'une saumure dans une eau souterraine immobile ou en mouvement très lent;

b) *l'entraînement*, développement dans la direction de l'écoulement primaire d'une zone de mélange stable, issue d'un cône initial d'infiltration dans lequel la dispersion depuis la source conduit rapidement à des concentrations

faibles. Le courant d'entraînement est prédominant par rapport aux contrastes de densité et de viscosité;

c) *le régime des instabilités*, stade intermédiaire entre l'entraînement et l'enfouissement, caractérisé par la formation de poches à l'interface inférieur de la zone de mélange ainsi que par l'abaissement progressif de l'interface supérieur.

Quelques aspects de ces trois types d'infiltration se retrouvent dans les considérations théoriques et de similitude exposées ci-dessous.

Schéma théorique dans le cas de l'entraînement et contrôle expérimental.

Le déversement en un point de l'aquifère d'une substance soluble dans l'eau est à l'origine d'un processus de mélange. La base physique de l'étude est constituée par un courant uniforme d'eau à travers le milieu poreux et une source noyée, à débit contrôlé d'un fluide secondaire.

La veine expérimentale bidimensionnelle utilisée est verticale, de faible épaisseur (quelques diamètres de grain) à parois transparentes.

La forme géométrique de la zone de mélange est fonction de paramètres liés aux caractéristiques physiques des

liquides en présence et aux conditions d'écoulement de ces liquides dans le terrain perméable.

Contrairement aux phénomènes enregistrés dans le cas d'un déplacement miscible classique, nous ne sommes plus en présence ici d'une évolution de la zone de transition entre deux liquides initialement séparés par un interface net [1 et 2]. Dans le cas de l'entraînement, seul le fluide primaire (l'eau) circule à l'origine à travers le milieu poreux. La source de fluide secondaire (NaCl en solution) se superpose au courant primaire et, sous l'effet conjugué de ce courant et de la miscibilité des liquides, le cône d'enfouissement provoqué par la différence des masses volumiques subit une déviation pour former la zone d'entraînement. Nous examinons ici le cas d'un régime établi, permanent et stable : concentrations variables dans l'espace mais indépendantes du temps ($\partial C/\partial t = 0$). Dans ce cas, il apparaît que les concentrations en NaCl resteront faibles [$C(x, y) < 1\%$]

Le schéma proposé est relatif à cette zone d'entraînement orientée dans la direction de l'écoulement principal et dont l'élargissement transversal, en s'éloignant de la source, peut s'expliquer par un mécanisme de dispersion.

La tentative de résolution théorique (fig. 2) met en jeu une impulsion rectangulaire résultant de deux échelons en opposition; les conditions initiales relatives à la distribution des concentrations sont définies comme suit :

- pour l'échelon supérieur, par $C = 0$ si $y < y_1$ et $C = C_0$ si $y > y_1$;
- pour l'échelon inférieur, par $C = C_0$ si $y < y_2$ et $C = 0$ si $y > y_2$;

$y_2 - y_1$ étant la largeur de l'impulsion rectangulaire.

L'origine du repère Ox, Oy est le « point source ». L'équation de dispersion simplifiée (écoulement permanent, dispersion transversale prédominante) s'écrit :

$$\bar{u} \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$

\bar{u} étant la vitesse réelle moyenne de l'écoulement dans la direction Ox et D_y , le coefficient de dispersion transversale.

Les solutions de cette équation, compte tenu des conditions initiales s'expriment alors :

- pour l'échelon supérieur (indice 1) par :

$$C = C_1 = \frac{1}{2} C_0 (1 + \operatorname{erf} Z_1)$$

avec :

$$Z_1 = \frac{y - y_1}{2\sqrt{D_{y1} x/\bar{u}}}$$

- pour l'échelon inférieur (indice 2) par :

$$C = C_2 = \frac{1}{2} C_0 (1 - \operatorname{erf} Z_2)$$

avec :

$$Z_2 = \frac{y - y_2}{2\sqrt{D_{y2} x/\bar{u}}}$$

sachant que :

$$\operatorname{erf} Z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-s^2} ds$$

Par l'opération $C = C_1 - (C_0 - C_2)$, le profil théorique obtenu après déformation de l'impulsion rectangulaire initiale (pour $x = \text{Cte}$) a pour équation :

$$C/C_0 = \frac{1}{2} (\operatorname{erf} Z_1 - \operatorname{erf} Z_2)$$

Notons par C^* le rapport C/C_0 pour aboutir à la forme réduite de l'équation des courbes théoriques de répartition transversale des concentrations dans les sections $x = \text{Cte}$:

$$C^* = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{z_2}^{z_1} e^{-s^2} ds$$

Pour tenir compte de la nature physique du phénomène (influence de la pesanteur par exemple), cette approche théorique permet une déformation dissymétrique des échelons définissant la dispersion au niveau des limites supérieures et inférieures de la zone de mélange ($D_{y1} \neq D_{y2}$).

La vérification de ce schéma est faite à partir de mesures de concentration dans la zone de mélange obtenue sur modèle bidimensionnel.

Les profils expérimentaux de variation transversale des concentrations à diverses distances de l'origine (fig. 3) permettent de déterminer la largeur $l_0 = y_2 - y_1$ et l'amplitude $C = C_0$ de l'impulsion rectangulaire initiale. Le calcul des coefficients de dispersion D_{y1} et D_{y2} est fait à partir de l'un de ces profils $C(x = x_0, y)$.

En introduisant ces données dans les solutions de l'équation de dispersion, on obtient les distributions théoriques des concentrations. On note une bonne concordance avec les résultats expérimentaux, compte tenu des difficultés de mesure aux limites de la zone de mélange [3].

Quelques aspects de la similitude.

Les essais effectués sur modèles physiques mettent en évidence les différentes formes de l'écoulement miscible engendrées par une infiltration locale de saumure dans une eau souterraine au repos ou en mouvement.

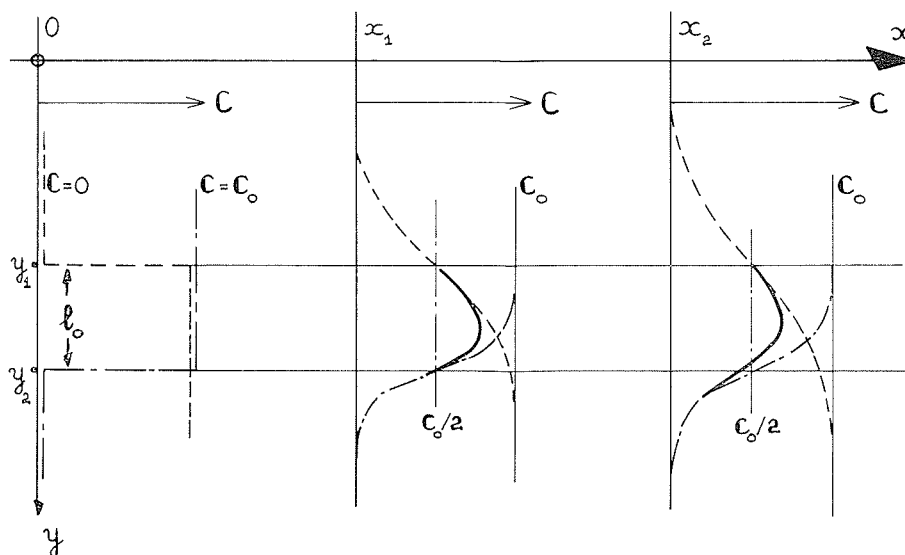
Les résultats quantitatifs sont cependant liés aux conditions expérimentales, leur extension et leur généralisation nécessitent la connaissance des critères de similitude.

En fait, la multiplicité des facteurs géométriques (contours, grains), physiques (viscosités, masses volumiques) et mécaniques (vitesses, perméabilités, coef. de dispersion) rend difficile toute analyse dimensionnelle classique.

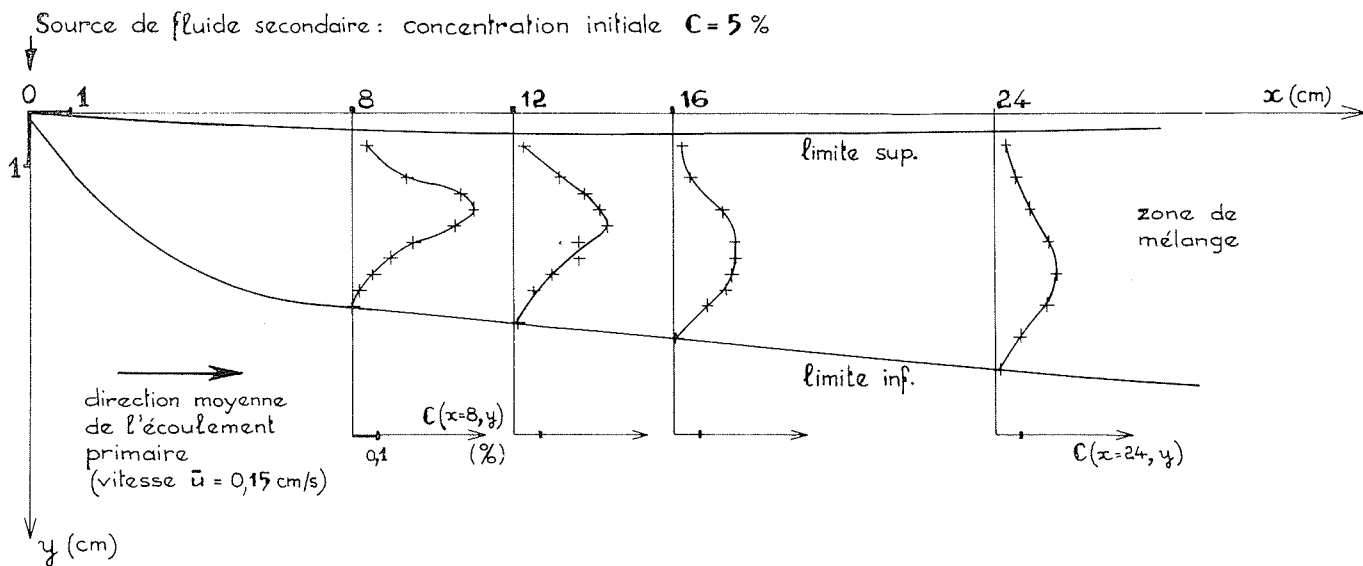
Nous retrouvons alors le véritable intérêt des modèles dans la possibilité de transposer la naissance et le développement de phénomènes d'écoulement à d'autres échelles. Aussi, dans un premier temps, avons-nous essayé de dégager les facteurs de similitude globaux pour un phénomène donné en l'analysant sur des modèles à différentes échelles. Une ligne directrice est tracée par la nécessité de réduire les intervalles de temps, les écoulements étant toujours très lents. Cette considération élimine la similitude géométrique totale : le choix de grains plus petits pour le modèle entraîne une évolution plus lente de tout phénomène réel étudié.

C'est donc la voie d'une similitude géométrique partielle que nous explorons : réduction des contours extérieurs avec maintien, voire augmentation de la dimension des grains constituant le massif perméable.

Les expériences ont été faites par conséquent sur un certain nombre de matrices poreuses semblables, avec ou sans distorsion granulométrique. Les mesures relatives à des distances de parcours homologues concernent le déplacement des fronts salins, la variation d'angles d'enfouissement.



2/ Schéma d'évolution théorique des concentrations dans la zone d'entraînement.



3/ Profils expérimentaux de variation transversale des concentrations à diverses distances de l'origine.

sement, la largeur de zones de mélange, les valeurs des concentrations moyennes en sel et des coefficients de dispersion. De l'ensemble des essais se dégagent alors des critères de similitude caractéristiques de certains aspects du type d'écoulement miscible étudié.

Pour des concentrations initiales de la saumure, nous avons toujours choisi les mêmes valeurs d'un modèle à l'autre, afin de conserver le champ de pesanteur réduite défini par :

$$g' = (\Delta\rho/\rho_0) g$$

ρ_0 : masse volumique de l'eau, ρ : masse volumique de la saumure et $\Delta\rho = \rho - \rho_0$.

MM. Trinh-Thieu et Brun, dans leur mémoire de thèse en cours de rédaction, fourniront des éléments de réponse aux questions posées par le problème de la similitude pour l'infiltration d'un front salin en milieu poreux et pour l'effoulement — entraînement (régime des instabilités).

Rappelons cependant que les essais sur modèles sont inévitablement une schématisation, de sorte que tout résultat obtenu selon ces méthodes de laboratoire et extrapolé au phénomène *in situ* demande une confirmation, à l'échelle 1, de la valeur des critères de similitude ainsi dégagés.

Etudes de laboratoire relatives à la pollution accidentelle de l'aquifère par les produits pétroliers

Conséquences d'une fuite de pétrole brut à partir d'un oléoduc.

L'étude de l'infiltration et du déplacement de pétrole brut dans un terrain perméable avait été entreprise dans notre laboratoire dès 1961, alors que fut posé devant la Commission interministérielle d'étude de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace, présidée par l'Ingénieur général Brunotte (G.R.E.F.), le problème de la protection des réserves aquifères lors de la traversée de zones de captage par le pipe-line sud-européen.

L'ensemble des expériences faites a permis de mettre en évidence le double aspect du déplacement de pétrole brut, présent sous forme d'une poche dans le milieu poreux, siège d'un écoulement uniforme d'eau. Nous distinguons en effet :

a) la fixation, après une migration lente et limitée, du volume de brut sur le composant solide (sable) du milieu expérimental;

b) l'entraînement des parties solubles dès le contact du pétrole avec l'eau saturant en partie seulement (frange d'écoulement capillaire) ou dans sa totalité le milieu poreux.

Le danger de pollution des eaux souterraines est essentiellement créé par la progression et la dispersion des substances solubles du pétrole dans l'eau (solubilité de l'ordre du mg/l). Signalons que ce sont les goût et saveur de l'eau qui sont détériorés dès que celle-ci contient des traces de l'ordre de 10^{-3} mg/l.

Cette progression s'opère dans la direction de l'écoulement, en minces filets formant « sillage » en aval de la poche de pétrole brut. La diffusion des produits solubles est cependant fonction de la stabilité relative du front de séparation eau-pétrole dont la configuration se modifie

sous l'effet de la moindre perturbation locale (mouvements du terrain ou de la nappe) entraînant la rupture de l'équilibre initial.

L'étude orientée vers la protection d'une nappe alluviale contre une éventuelle fuite d'un oléoduc en certains points critiques (passages sous rivière) est fondée sur la neutralisation hydrodynamique de la zone de pollution. Elle comprend :

- l'analyse du développement de la pollution dans le lit majeur du cours d'eau;
- l'expérimentation d'un dispositif antipollution assurant la protection des eaux souterraines et de la rivière.

Les recherches préliminaires ont été entreprises sur modèle bidimensionnel et consistaient à étudier le fonctionnement et l'effet d'un drain simple disposé parallèlement à l'oléoduc, en aval de celui-ci.

Les essais d'un drain à plusieurs éléments juxtaposés du type « flûte de Pan » ont été conduits sur modèle tridimensionnel. Ils ont montré entre autre que :

- le dispositif du drain en flûte de Pan permet de détecter localement les produits solubles provenant d'une fuite de l'oléoduc;
- l'absorption de ces produits est totale si la fuite de pétrole est peu importante et que le drain fonctionne en permanence;
- l'évacuation d'un volume important de brut est effective à condition d'étudier la position du drain par rapport à l'oléoduc.

Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs publications [4, 5 et 6].

Problèmes de pollution consécutifs aux accidents de transporteurs d'hydrocarbures.

Le problème général de la pollution par les produits pétroliers a été abordé durant les dernières années par de nombreux organismes et laboratoires de recherche [7, 8 et 9].

En Alsace, les services de la Protection civile alertés par le nombre croissant d'accidents de camions citernes et confrontés aux difficultés d'intervention et de dépollution efficace des sols et de l'eau, ont lancé pour 1971 une nouvelle campagne de recherche dans ce domaine.

Le programme proposé à l'Institut de Mécanique des Fluides comprend :

- l'étude de l'infiltration verticale du produit pétrolier à partir de la surface du sol jusqu'au toit de la nappe souterraine, à travers divers terrains plus ou moins humides (dans le cadre d'une convention avec l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse);
- l'étude de l'entraînement des substances solubles, après étalement du produit pétrolier, en fonction des conditions d'écoulement de l'eau souterraine et de la structure de l'aquifère.

Certaines données relatives aux valeurs maximales du taux de solubilité montrent que pour ces faibles concentrations, les résultats de mesure indiqués dans la littérature sont loin d'être convergents. Le problème est encore amplifié lorsqu'on veut exprimer les solubilités partielles possibles lors d'un contact eau-hydrocarbures, limité dans le temps. Aussi avons-nous mis au point un modèle qui permet de réaliser une surface de contact entre un produit pétrolier fixe et une nappe d'eau en mouvement.

Dans une première étape, nous avons étudié le phéno-

mène de léchage et d'échange en l'absence de milieu poreux. Les produits utilisés sont un gas-oil et un supercarburant.

L'analyse chimique de l'effluent, par extraction au tétrachlorure de carbone, a montré que dans les mêmes conditions d'écoulement de l'eau sous-jacente, l'apport du supercarburant est environ 10 fois supérieur à celui du gas-oil. Pour des vitesses comparables à celles d'un écoulement souterrain, le taux de solubilité maximum n'est pas atteint. L'influence de la vitesse de l'eau est apparue dans le cas du supercarburant; dans celui du gas-oil, les valeurs des concentrations relevées (0,1 à 0,2 mg/l) sont trop faibles pour y attacher des conclusions valables car on est à la limite de sensibilité de la méthode d'analyse.

La poursuite et le développement en cours de ces essais en milieu poreux permettront de se rapprocher encore des conditions effectives de pollution des eaux souterraines.

Conclusion

Les divers travaux effectués sur modèles physiques de laboratoire et dont nous venons de présenter certains aspects, montrent qu'un problème économique et humain tel la pollution des eaux souterraines, peut conduire à une recherche scientifique appliquée mais aussi fondamentale qui actuellement est dans sa première phase.

Les techniques expérimentales de visualisation et d'observation des phénomènes permettent de distinguer les divers aspects de l'infiltration et de l'entraînement d'un liquide secondaire dans un écoulement d'eau souterraine :

— modes de développement de la zone de mélange saumure-eau douce (cas où le fluide secondaire est totalement miscible à l'eau);

— migration et fixation de produits pétroliers et entraînement des parties solubles (fluide secondaire non miscible dans son ensemble; seules de faibles proportions, quelques ppm, sont solubles dans l'eau).

Dans le cas de deux fluides miscibles, il a été possible (lorsque la zone d'entraînement est stable et établie) de présenter un schéma théorique qui rattache nos essais au problème général de la dispersion. L'exploration quan-

titative des concentrations conduit à la détermination des coefficients de dispersion et à la vérification de l'approche théorique proposée.

C'est dans la voie de l'analyse quantitative que nous orientons nos travaux sur l'entraînement de produits solubles d'hydrocarbures dans une nappe phréatique.

Nos projets sont de développer une série d'expériences dans ce domaine pour aboutir à une étude d'ensemble sur modèle à trois dimensions.

Nos considérations de similitude montrent que l'extrapolation au phénomène *in situ* est à confronter avec des essais sur le terrain: ainsi nos travaux s'inscrivent dans le cadre d'une collaboration avec d'autres services et laboratoires spécialisés dans les domaines de l'hydrogéologie, de l'analyse chimique et de la lutte anti-pollution.

Bibliographie sommaire

- [1] PFANKUCH (H.O.). — Contribution à l'étude des déplacements de fluides miscibles dans un milieu poreux. Thèse, Fac. Sci. Paris (1962). *Rev. I.F.P.*, vol. XVIII, n° 2-1963. *Ed. Technip*, Paris.
- [2] BLANC (G.). — Contribution à l'étude des déplacements par fluides miscibles dans un milieu poreux. Dispersion transverse. Thèse, Fac. Sci. Toulouse (1967), *Rap. I.F.P.* réf. 14451.
- [3] ZILLIOX (L.). — Etude physique des écoulements de liquides miscibles en milieu poreux. Application à la pollution des eaux souterraines. Thèse, Fac. Sci. Strasbourg (1969), *Institut de Mécanique des Fluides*.
- [4] SACKMANN (L.-A.) et ZILLIOX (L.). — Pollution et protection des nappes d'eau souterraines. *Rev. Techn. Sci. Munic.*, Paris, 58-n° 6, p. 223-235, juin 1963.
- [5] SACKMANN (L.-A.). — Dispositif de détection et de neutralisation hydrodynamique. Procès-verbal de dépôt, 17 mai 1963, brevet n° 7757.
- [6] ZILLIOX (L.). — Pollution des nappes d'eau souterraines par infiltration de pétrole brut. Etude de l'évolution dynamique. *Bull. B.R.G.M.*, 2^e série, Section III, n° 4 (1968). *Ed. B.R.G.M.*, Paris.
- [7] DAM (J. Van). — The migration of hydrocarbons in a Water-bearing stratum. Communication du Stichting Concave, La Haye.
- [8] Mitteilungen aus dem Institut für Wasserwirtschaft und landwirtschaftlichen Wasserbau der Technischen Universität Hannover. *Heft Nr. 15-16-17*, Hannover (1969).
- [9] Etude bibliographique sur la « Pollution par les hydrocarbures ». Université de Strasbourg, *S.G.A.L.* (novembre 1969).

Discussion

Président : M. J.-C. SUZANNE

M. le Président donne la parole à M. ZILLIOX qui expose tout d'abord la communication de M. SACKMANN :

« Protection de la nappe souterraine; contrôle de la nappe phréatique rhénane et moyens de lutte contre la pollution »

et ensuite celle de MM. ZILLIOX et MUNTZER :

« Etude sur modèles physique du mécanisme de la pollution des eaux souterraines par liquides miscibles (Saumures) et non miscibles (hydrocarbures) »

M. le Président remercie vivement M. ZILLIOX et aussi les auteurs de ces deux mémoires qui ont bien mis en lumière les principaux facteurs de la pollution des eaux souterraines dans la plaine d'Alsace.

C'est là un problème très important souligne M. le Président car une nappe souterraine très étendue assure actuellement, pour ainsi dire, toutes les ressources en eau de l'Alsace.

Or, cette nappe souterraine est très menacée; par le sel d'abord: les mines de potasse, dans le sud, déversent chaque jour de grosses quantités de sel dans le Rhin et dans la nappe; par les hydrocarbures ensuite: l'oléoduc européen traverse la plaine. Jusqu'à présent, il n'y a pas eu d'accident car cet oléoduc est très surveillé. Ce sont surtout les pollutions accidentelles qui sont à redouter: l'année dernière, il y a eu trente accidents « de camion » (presque un par semaine) provoquant un déversement d'hydrocarbures ou d'autres produits plus ou moins toxiques dans la nappe. Il y a eu notamment un accident de tétrachlorure de carbone assez catastrophique.

Un autre problème doit retenir l'attention: c'est celui des citernes de fuel, enterrées un peu n'importe où, sans aucune précaution, et qui se corrodent; ici et là, des pollutions apparaissent parce que les citernes se sont peu à peu vidées par des fissures.

Le problème de la pollution des nappes souterraines est donc très grave pour l'Alsace: aussi est-ce l'une des préoccupations de l'Agence de bassin « Rhin-Meuse ». Celle-ci finance un nombre

important d'études : elle a financé en partie les études du Professeur SACKMANN et en totalité des études menées par le service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine.

Ces diverses études vont aboutir à la mise sur pied d'un modèle hydrodynamique unique de gestion de la nappe d'Alsace.

En outre, il existe des modèles de programmation des pollutions. En particulier, nous avons des modèles mathématiques et analogiques de programmation de la pollution saline pour prévoir l'avenir : d'une part, dans le cas où l'on ne ferait rien, d'autre part, dans le cas où quelque chose serait fait pour porter remède aux inconvénients constatés.

Je signale aussi les interventions (auxquelles on a fait allusion) de la Protection civile; celle-ci est prête à intervenir, mais elle n'a pas d'argent. Or, il faut payer le déplacement des pompiers ou des entreprises qui vont récupérer les terres polluées.

J'espère que ces quelques indications permettront de mieux situer la discussion et j'ouvre le débat.

M. le Professeur SCHOELLER pose la question suivante :

Dans quelle mesure a-t-on tenu compte, dans les travaux exposés, de la différence de tension superficielle entre l'eau et le polluant, le pétrole, en particulier. A première vue, cette différence de tension superficielle localise l'huile dans la frange capillaire et retient l'huile sous la zone de pollution, laissant échapper vers l'aval une traînée d'huile dispersée ?

Nous avons fait uniquement, répond M. ZILLIOX, une étude qualitative pour schématiser les différents cas de pollution qui peuvent intervenir, soit par des infiltrations à partir de la surface du sol à travers le terrain sec pour aboutir ensuite au droit de la nappe, soit par des pollutions qui ont directement lieu dans la partie saturée du terrain. Dans ce cas-là, nous n'avons pas explicité l'influence de la tension superficielle.

Nous sommes intéressés au cheminement des substances solubles qui sont entraînées par le courant de la nappe car finalement ce sont ces produits-là qui sont dangereux, beaucoup plus dangereux que l'huile qui se fixe plus ou moins au bout d'un certain nombre de jours.

En vue de compléter son information pour la mise au point de modèles mathématiques de dispersion de la pollution, M. UNGEMACH demande à MM. ZILLIOX et MUNTZER, si leurs modèles physiques tiennent compte d'effluents de forte concentration, tels que ceux pouvant provenir de stockages du chlorure de sodium en surface, (on a constaté dans les terres voisines des concentrations en NaCl de l'ordre de 300 g/l, c'est-à-dire proches de la saturation).

D'autre part, quelle est la nature du milieu poreux représenté par le modèle isotrope ? stratifié ?

M. ZILLIOX répond que le cas d'un effluent à forte concentration a été aussi abordé; mais dans ce cas, l'infiltration prend la forme d'un « enfouissement », et l'on s'écarte du schéma théorique étudié, lequel concerne uniquement l'entraînement dynamique d'une masse de saumure relativement faible par rapport à l'eau de la nappe.

En ce qui concerne la deuxième question posée, M. ZILLIOX précise que les milieux poreux réalisés pour son étude étaient des milieux homogènes à perméabilité isotrope. Des essais ont été effectués sur des milieux stratifiés mais ils sont encore en nombre relativement faible. Il est prévu de les systématiser dans l'avenir.

Quelles étaient les vitesses de filtration utilisées sur vos modèles, demande M. BOSSY ? Avez-vous expérimenté avec des vitesses différentes ?

Elles étaient de l'ordre de 0,15 cm/s dans les expériences présentées ici, et par conséquent plus élevées que celles relevées dans la nature, répond M. ZILLIOX. Des expériences ont aussi été réalisées avec des vitesses de 100 cm/h; l'entraînement dynamique se produit de la même façon à condition d'adapter le débit de saumure.

M. le Professeur THIRRIOT, très intéressé par l'ensemble des recherches exposées, souhaiterait connaître les conclusions des auteurs en ce qui concerne les critères de similitude à considérer dans ce genre de problème et les degrés de liberté dont on dispose en pratique pour la conception et l'exploitation des modèles correspondants.

Le problème de la similitude est assez délicat pour de tels modèles, et nous poursuivons encore des études sur ce sujet, répond M. ZILLIOX. Nous sommes partis de modèles à travers lesquels

s'écoulait d'abord le fluide primaire; vu la faible valeur du nombre de Reynolds, cet écoulement est du type Darcy. Nous avons à notre disposition une série d'échelles de longueur, de temps, de vitesse, de débit par conséquent; *a priori*, nous avons adopté l'échelle 1 pour les concentrations afin de conserver le champ de pesanteur réduite, car sur le modèle, nous utilisons exactement le même fluide primaire que dans la nature.

Nous avons, en ce qui concerne l'échelle des débits d'infiltration du fluide secondaire, conservé l'échelle des débits qui nous était donnée par écoulement primaire.

Dans les études où nous avons utilisé des modèles géométriquement semblables, en prenant un milieu poreux (qui, dans ce cas était constitué par des billes de verre de 1, 2 et 3 mm de diamètre), il y avait similitude totale. Nous avons constaté que cette façon d'envisager la similitude « marchait » pour la représentation de l'écoulement d'entraînement dynamique.

En ce qui concerne l'infiltration en régime d'instabilité, le problème est évidemment plus délicat. Nous étudions actuellement les critères de stabilité de l'écoulement physique.

Dans ces critères, intervient le rapport du débit d'infiltration à la vitesse de l'écoulement primaire et aussi — implicitement — les différentes viscosités et les différences de masses. C'est-à-dire, qu'en définitive, critères de stabilité et critères de similitude forment un ensemble.

Dans le cas étudié ici, la dispersion transversale dans les zones de mélange, correspond à des valeurs de coefficient de dispersion transversale (milieux homogènes) de l'ordre de 10^{-2} cm²/s alors que les coefficients de diffusion moléculaire pour les solutions de chlorure de sodium utilisées pour les concentrations mesurées réellement dans la veine expérimentale se situent aux environs de $1,3 \times 10^{-5}$ cm²/s.

On se trouve donc dans un régime où la dispersion mécanique prédomine par rapport à la diffusion moléculaire.

Dans les limites de nos essais, la dimension des grains n'a pas d'influence sur la configuration de la zone de mélange.

En ce qui concerne la naissance des instabilités, donc le passage au régime de transition entre l'entraînement dynamique et « l'enfouissement », nous avons remarqué que le diamètre des grains intervient. D'ailleurs, le diamètre des grains interviendra finalement dans le critère de stabilité que nous sommes en train de définir.

J'ai constaté, dit M. ESTIENNE, dans des remblais mis en place hydrauliquement des perméabilités horizontales souvent supérieures à dix fois les perméabilités verticales. Dans ces conditions, je me demande si les critères de stabilité auront une signification pour une zone où les alluvions ont été déposées dans des conditions un peu analogues aux remblais hydrauliques. Avez-vous une idée des différences de perméabilité entre la perméabilité verticale et la perméabilité horizontale ?

Pour la nappe alsacienne, le rapport de ces deux perméabilités est de l'ordre de 50, estime M. ZILLIOX, tandis que M. UNGEMACH a trouvé des valeurs voisines de 100 sur le site de l'usine hydroélectrique E.D.F. de Strasbourg.

N'est-il pas possible, demande M. le Professeur THIRRIOT, d'utiliser une distorsion comme cela se fait couramment lorsqu'on s'intéresse aux terrains non isotropes, puisqu'en définitive, il s'agit d'une instabilité de Taylor et qu'au début la courbure de l'interface est pratiquement négligeable.

Effectivement, observe M. ZILLIOX, nous avons réalisé un petit modèle qui représentait globalement l'ensemble de l'aquifère rhénan depuis les abords de Bâle jusqu'à Strasbourg; nous avons adopté une distorsion de 1 à 40 : sur une distance de 100 km et sur une profondeur de 200 à 250 m, on pouvait observer ce qui peut se produire au point de vue « enfouissement » et « entraînement » dans la direction de l'écoulement de l'eau.

Un échange de vues auquel participent M. BONNET, M. THIRRIOT, M. REMENIERAS, M. ZILLIOX, s'instaure ensuite sur divers points de la conduite des essais : calcul du coefficient de dispersion d'après le relevé sur le modèle des concentrations dans la zone de dilution « plume », influence de la frange capillaire, intérêt d'utiliser des liquides plus visqueux que l'eau, etc.

Tenu par les exigences de l'horaire, M. le Président clôt la discussion en remerciant tous ceux qui ont contribué à en faire un dialogue fort animé.

Abstract

Physical model study of the process involved in ground water pollution by miscible and immiscible liquids (e.g. brine and mineral oil)

General subject of research.

The research described covered problems associated with the danger of the Alsace plain aquifer becoming polluted by both accidental leakage of petroleum products and brine seepage from storage areas.

Physical models allow the effect of the main characteristic parameters of possible ground water pollution development to be determined; by simplifying the natural medium whilst preserving its elementary structure, a direct picture of the flow pattern is obtained.

Development of the mixing zone associated with brine seepage into an aquifer.

The mixing zone starts out from a brine source in a uniform flow of water. Tests on a two-dimensional model showed the three following types of flow:

- a) Downward flow, i.e. vertical infiltration.
- b) Entrainment flow, i.e. the spread of the mixing zone along the direction of water flow.
- c) Unstable flow, i.e. an intermediate stage between (a) and (b).
By means of a theoretical scheme, the entrainment effect was

related to the general problem of spread in a porous medium. The data obtained were found to agree satisfactorily with the results of concentration measurements in the mixing zone.

Similarity criteria are required to extend and generalise the quantitative data. Transposition of the various flow types is feasible on a physical model: extrapolated full-scale data require comparing with *in-situ* test data.

Laboratory tests on accidental aquifer pollution by petroleum products.

The basic investigation in the research programme on the effects of leakage from a petroleum pipeline showed the two aspects of the spread of petroleum in the aquifer, i.e. the fixing of the crude oil and the entrainment of soluble particles in the aquifer. The applied research carried out to determine means of protecting the alluvial aquifer against leakage from pipelines passing underneath rivers was followed by tests on a hydrodynamic anti-pollution device.

Research is now in progress on water and ground pollution by refinery product conveyors. The first tests are investigating the transfer effects taking place at the initial contact surface between the stationary petroleum product and the aquifer flow.

