

CONSEIL DE L'EUROPE ————— ————— COUNCIL OF EUROPE

Strasbourg, le 7 mars 1985

AS/Science/NPR (37) 2

ASSEMBLÉE PARLEMENTAIRE

GROUPE DE TRAVAIL NAPPE PHREATIQUE RHENANE

convoqué à l'initiative de la
COMMISSION DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE



PACECOM071258

CRITIQUES ET ANALYSE DE CAS DE POLLUTION PAR LES HUILES MINÉRALES
EN VUE DE LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES

4e Partie

Exemples

Description d'un choix de cas de pollution par les huiles minérales

Collaborateurs

F. Birk, Bochum
• P. Bitterli-Brunner, Basel
K. Fehr, Zürich
A. Golwer, Wiesbaden
• L. Hauber, Basel
H. H~~u~~drauf, München
W. K~~u~~ss, Freiburg i. Br.
Th. Kempf, Zürich
H. Knausenberger, Essen
P. Muntzer, Strasbourg
D. Rottgardt, Hannover

H. J. Scharpff, Wiesbaden
W. Scholz, Stuttgart
H. J. Schmassmann, Liestal
F. Schwille, Koblenz
H. Tangermann, Wiesbaden
Ch. Vorreyer, Krefeld
H. G. Van Waegeningh, Voorburg
L. Wyssling, Pfaffhausen/ZH
L. Zilliox, Strasbourg
L. Zwitnig, Graz

Strasbourg, en mai 1980

Reproduction et exploitation autorisées en indiquant la référence

PREFACE

La protection des ressources naturelles en eaux souterraines contre la pollution compte dans l'espace européen parmi les tâches les plus urgentes de la recherche appliquée à l'hydrogéologie, aussi bien que de l'administration chargée de la gestion des eaux. Parmi la multitude des substances susceptibles de contaminer l'eau, les produits d'huiles minérales, transportés et stockés jusque dans les localités les plus éloignées, jouent un rôle particulier.

L'importance primordiale des ressources en eau souterraine du fossé rhénan et leur sensibilité vis-à-vis de la pollution a conduit le Groupe de travail "nappe phréatique rhénane" de la Commission de la Science et de la Technologie de l'Assemblée parlementaire du Conseil de l'Europe à inviter les savants des pays limitrophes du Rhin s'occupant des problèmes relatifs aux eaux souterraines et aux huiles minérales, d'élaborer un manuel approprié traitant l'ensemble de la protection de l'eau contre la pollution par les huiles. Dès le départ, il était évident que ceci devait être réalisé par une collaboration étroite entre ledit groupe de travail du Conseil de l'Europe et le groupe correspondant "Eau et huile minérale" du Ministère de l'Intérieur de Bonn. Ce groupe avait, à la même époque, repris son "Guide de l'étude et du traitement de la pollution par les huiles minérales", édité en 1969, pour le mettre à jour des connaissances les plus récentes. Il est envisagé d'éditer le même traité en allemand, français et en anglais.

Pour faciliter l'élaboration et améliorer une vue d'ensemble du manuel, ce dernier a été divisé en 4 parties principales, correspondant chacune à un centre d'intérêt, mais présentant des références réciproques entre elles.

1. Les fondements scientifiques nécessaires à la compréhension du comportement des huiles minérales dans le sous-sol.
2. Mesures. Examen des pollutions par les huiles minérales et réalisation pratique des mesures de défense et d'assainissement.
3. Analytique. Prélèvement des échantillons, méthodologie, interprétation.
4. Exemples. Description d'un choix de cas de pollution par les huiles minérales.

La 3e partie traitant l'analytique a été achevée en premier en janvier 1979 et mise à la disposition d'un nombre restreint de spécialistes sous forme de projet. Maintenant la 4e partie est terminée pour l'essentiel, elle sera de même distribuée dans un cercle restreint. Le Groupe de travail voudrait ainsi encourager l'un ou l'autre spécialiste de mettre à sa disposition d'autres exemples pour compléter la présente collection et ce dans la mesure où ces exemples concernent des aspects intéressants, non encore envisagés du "problème huile". Ces contributions pourraient alors être intégrées dans l'édition définitive.

Le responsable du Groupe de travail
" eau et huile minérale "

Coblence, en décembre 1980

★) Adresse :

Dr. F. Schwille, c/o Bundesanstalt für Gewässerkunde
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15-17, Postfach 309
D-5400 Coblence

./.

TABLE DES MATIERES

Remarques préliminaires

Description des cas de pollution

Cas n°	Désignation locale	Situation géographique	Page
1	Klybeck, Basel	Fossé rhénan	1
2	Kleinhüningen, Basel	Fossé rhénan	4
3	Zürich	Plaine suisse	7
4	Niederhasli	Plaine suisse	11
5	Strasbourg-Entzheim	Fossé rhénan	15
6	Haguenau	Basse-Alsace	18
7	Hoenheim	Fossé rhénan	21
8	Mannheim	Fossé rhénan	22
9	Heidelberg-Wieblingen	Fossé rhénan	26
10	Feldversuch Graben-Neudorf	Fossé rhénan	28
11	Huttenheim	Fossé rhénan	31
12	Hockenheim	Fossé rhénan	32
13	Frankenthal	Fossé rhénan	33
14	Rüsselsheim	Vallée inférieure du Main	35
15	Frankfurt, Osthafen	Vallée inférieure du Main	37
16	Raunheim	Plaine Rhin-Main	38
17	Industriegebiet X	Région Rhin-Main	43
18	Würzburg	Vallée du Main	46
19	Aalen	Jura souabe	46
20	Ravensburg	Préalpes souabes	49
21	München	Cône de déjection de Munich	52
22	Feldkirchen	Cône de déjection de Munich	53
23	Landau	Isar	53
24	Autobahn München-Garmisch	Préalpes bavaroises	55
25	Burghausen	Salzach	57
26	Koblenz	Vallée du Rhin moyen	59
27	Remagen	Vallée du Rhin moyen	62
28	Netphen	Siegerland	62
29	Bad Münstereifel	Eifel	64
30	Köln-Niehl	Rhin inférieur	65
31	Düsseldorf-Reisholz	Rhin inférieur	68
32	Friedrichsfeld-Bucholtswelmen	Basse vallée de la Lippe	71
33	Wesel-Obrighoven	Plaine basse du Rhin inférieur	71
34	Essen-Kupferdreh	Ruhr	73
35	Münster	Pays de Munster	75
36	Dortmund	Ruhr	76
37	Schermbeck	Plaine basse du Rhin inférieur	78
38	Harrenstätte	Pays d'Ems	79
39	Ochtrup	Pays de Munster du Nord	79
40	Georgsdorf	Pays d'Ems	81
41	Scheerhorn	Pays d'Ems	82
42	Rouen	Haute-Normandie	82
43	Rheinfelden	Vallée du Rhin supérieur	85
44	Kapfenberg	Steiermark	87
45	Weerselo	Pays-Bas	88
46	Den Haag	Pays-Bas	89
47	Velsen I	Hollande du Nord	90
48	Velsen II	Hollande du Nord	93

Cas n°	Désignation locale	Situation géographique	Page
201	Vaihingen/Enz	Bas-pays du Wurttemberg	94
202	Neckarsulm	Bassin de Heilbronn	95
203	Kirchheim-Jesingen	Avant-pays du Jura souabe	97
204	Schwäbisch Gmünd	Avant-pays du Jura souabe	999
205	Ö.	Sud-ouest de l'Allemagne	101
206	Bad Ems	Massif schisteux rhénan	103
207	Münnerstadt	Franconie	104
208	Nordhalben	Frankenwald	105
209	Bochum I	Ruhr	106
210	Bochum II	Ruhr	108
211	Essen-Innenstadt	Ruhr	108
212	Coesfeld	Pays de Munster	112
213	Picardie	Picardie	113
214	Charmoille	Jura suisse	114
215	Langenbrück	Jura suisse	116

REMARQUE PRELIMINAIRE

Dans la première partie de ce manuel est exposé d'une façon générale le comportement de l'huile minérale dans le sous-sol ; de la même manière, la 2e partie ne traite que les généralités des dispositions à prendre pour l'étude des pollutions par huile et la réalisation pratique des mesures de protection. Pour illustrer les diverses mesures d'analyse, de protection et d'assainissement résultant de la diversité des conditions géologiques et hydrogéologiques des eaux souterraines, ainsi que du volume et de l'évolution de la pollution, la 4e partie exposera en les simplifiant les aspects particulièrement instructifs d'exemples bien choisis. Les descriptions seront limitées aux données nécessaires à la compréhension de la situation décrite.

Le choix des exemples a été fait de manière à illustrer les problèmes de détail exposés dans les première et deuxième parties. Conformément au fait que dans la première partie les milieux poreux et karstiques ont été traités séparément, nous exposerons d'abord des exemples de pollution en milieu peu cohérent (cas 1 à 48), ensuite d'autres de pollution dans des roches compactes (cas 201 à 215). C'est pourquoi les figures sont numérotées de 4.1 à 4.100, resp. de 4.201 à 4.229.

La liste bibliographique n'indique que les ouvrages décrivant des cas de pollution complétant les exemples cités ici. Une liste exhaustive n'a pas été recherchée.

Les exemples décrits restent anonymes ; la localisation géographique n'est donnée que pour faciliter la compréhension. Il doit être souligné que les descriptions ont été faites par les chercheurs ayant traité les divers cas en fonction de leurs connaissances et que leurs remarques expriment leur avis personnel, en aucun cas celui des instituts ou des organismes dont ils font partie. Le groupe de travail s'est abstenu d'émettre un jugement des divers cas.

Le lecteur est libre de tirer des conclusions concernant l'opportunité des mesures prises. Les jugements prématurés sont à éviter. Seule la connaissance des conditions locales et de la totalité des circonstances permet de décider si les mesures proposées étaient justifiées ou non.

Cas 1 : Klybeck, Bâle (Fossé rhénan)

Au cours de l'été 1974, le long du chemin de halage septentrional du port rhénan Klybeck, sur la rive rhénane, une pollution par huile était constatée à plusieurs reprises (fig. 4.1). Les sorties d'huile se trouvaient un peu en contrebas du niveau du Rhin. Il était bien visible que les traînées d'huile étaient liées à des venues d'eau souterraine sortant entre les blocs de parement de la rive. En attendant le départ de l'enquête et la mise en oeuvre des mesures d'assainissement, les variations d'intensité des sorties d'huile pouvaient être observées durant de nombreuses semaines.

Dans la partie inférieure des tuyaux de ciment d'une nouvelle canalisation creusée dans le terrain industriel voisin, on pouvait observer à peu près en même temps une coloration sombre huileuse. Lors du creusement de la canalisation, on avait déjà constaté une forte pollution de l'eau souterraine par l'huile. On savait en plus qu'au cours des années précédentes des incidents s'étaient produits au cours du transvasement de mazout ou d'essence.

D'après les observations faites, les huiles minérales sortant avec les eaux souterraines provenaient des graviers et des remblais du terrain riverain où plusieurs sociétés de carburants possèdent des réservoirs et des tanks. Une étude hydrogéologique devait permettre de préciser les points de pollution. A cet effet, on creusa des tranches de reconnaissance au proche voisinage des sorties d'huile et des sondages dans le terrain avoisinant.

Dans la région étudiée, le mur imperméable de la nappe, situé vers la cote +237, est formé des marnes à septaries oligocènes (argiles bleues). Le Rhin et la Wiese ont déposé sur cette molasse des graviers pléistocènes et les ont remaniés maintes fois durant l'Holocène par leurs divagations et leurs inondations. Pour corriger les rives et aménager le terrain industriel, on a remblayé les vieux bras morts. Le résultat est que de nos jours on trouve jusque dans la nappe phréatique un mélange hétérogène de graviers, sables, humus, matériaux de démolition et autres.

Seules les couches du fond de cette couverture épaisse de 10 m environ sont formées de gravier non remanié. Au cause des alternances de graviers, de sables et de limons, les graviers mélangés du Rhin et de la Wiese ont une porosité variable; dans le domaine de la nappe, le remblais exerce une grande influence sur la perméabilité; il faut s'attendre à des variations extrêmes des valeurs k .

L'eau souterraine, circulant vers la profondeur de 4 m environ dans les graviers et les remblais artificiels, ne montre qu'une faible pente vers le Rhin ou la Wiese et cela même aux hautes eaux; le niveau varie en général entre les cotes 244,5 et 245,0 N.N. La pente le long du chemin de halage entre les tranchées 3 et 8 n'était que de 4 cm le 29.11.1974, c'est-à-dire environ 0,2 0/00 (fig. 4.2).

A la longue, le niveau de la nappe se raccorde à celui du niveau de barrage du rhinomètre. Bien qu'en principe le Rhin est l'effluent, il a été constaté au cours des dernières 10 années et au moyen des inscriptions du rhinomètre que durant plusieurs longues périodes le niveau moyen du rhinomètre dépassait en moyenne celui de la nappe phréatique le long du chemin de halage. En conséquence, l'eau souterraine de l'aire Klybeck provenait à certains moments du Rhin.

En premier lieu furent analysés des échantillons d'eau de 7 piézomètres existants et d'un puits d'assainissement; deux seulement contenaient des quantités d'hydrocarbures intéressantes à signaler, à savoir n° 175 et 1036. Sur les 8 tranchées qui furent creusées à la suite, on a trouvé dans 4 d'entre elles de l'huile minérale nageant sur l'eau; dans le n° 6 on en a mesuré 25 cm.

Les analyses de laboratoire ont reconnu les échantillons des tranchées 5,6 et 7 comme étant du fuel léger, tandis que le n° 8 était un mélange vieilli essence-fuel. Un échantillon pris dans le puits existant n° 1141 donna un fuel d'une autre composition.

Les échantillons de graviers prélevés dans les tranchées 1 et 3 à 6 au-dessus de la nappe ont tous donné des quantités faibles (0,3 mg/kg) de polluants rappelant les hydrocarbures; seule la tranchée du sondage 6 a montré à partir d'une profondeur de 1,5 m une pollution de 6,6 mg/Kg. Les échantillons des tranchées 1,3 et 4 n'ont fourni que des indices à peine discernables d'une pollution par huile.

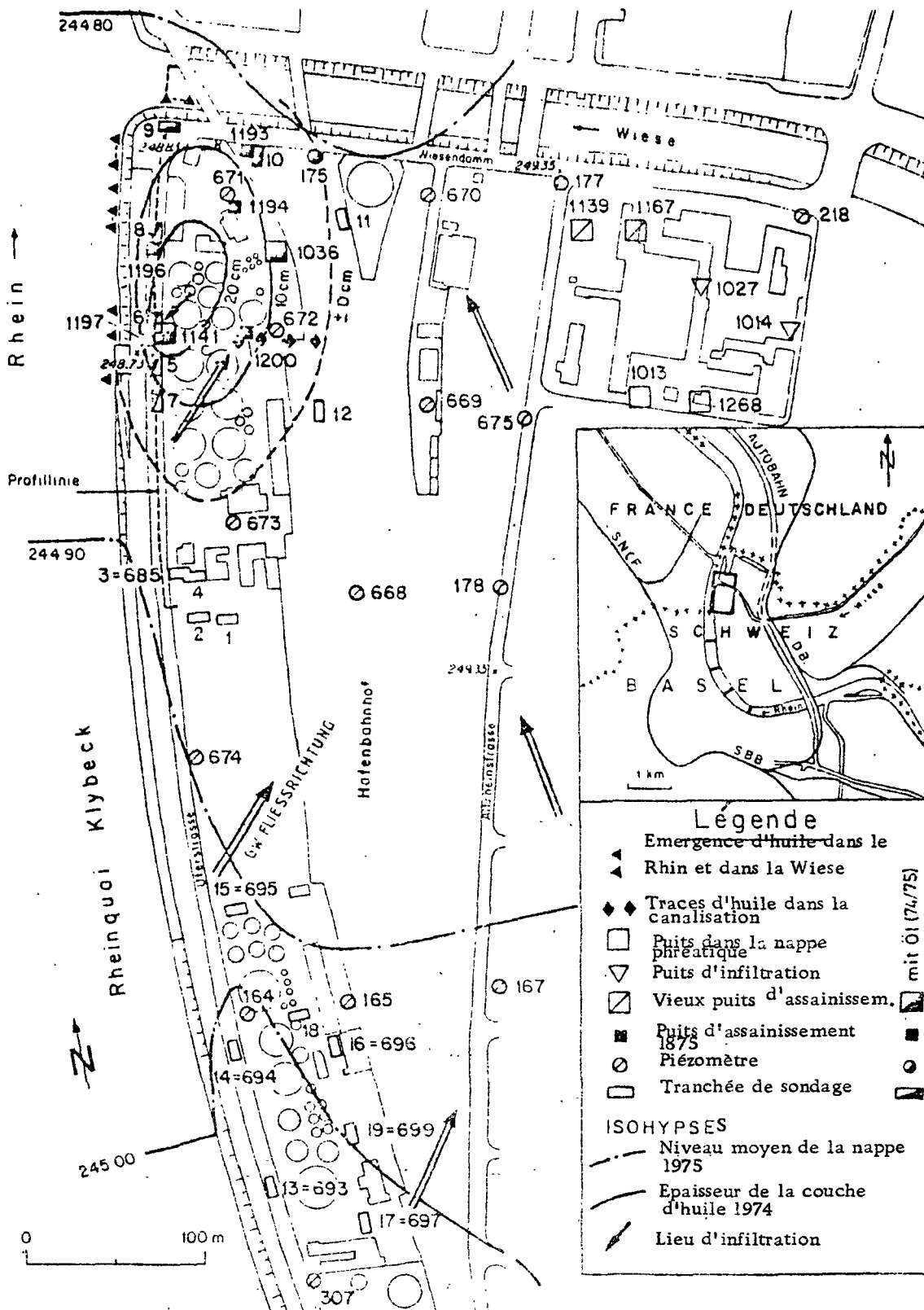


Bild 4.1. Cas Klybeck, Bâle. Plan de situation. Sens d'écoulement de la nappe phréatique, extension de l'huile.

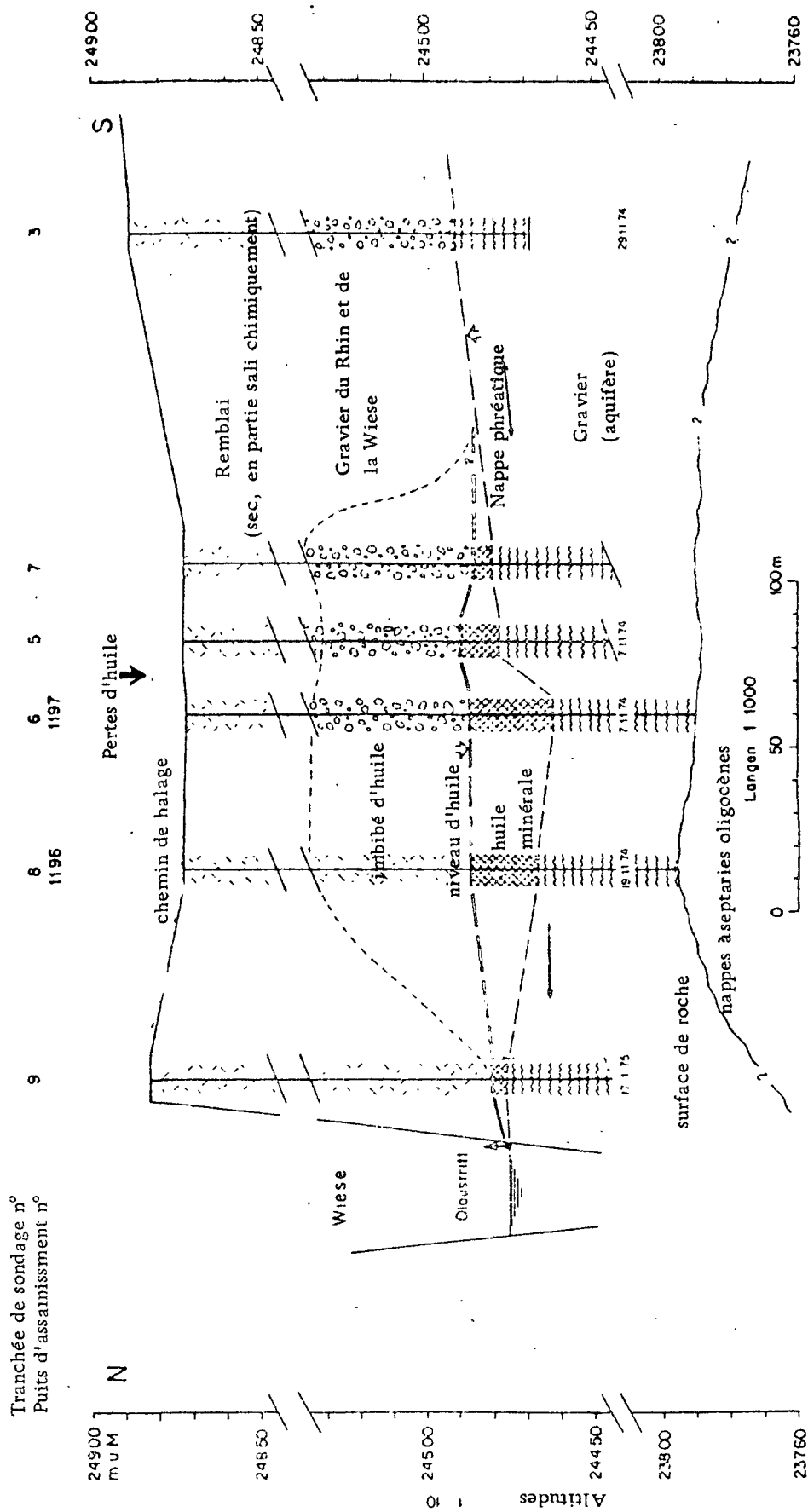


Bild 4.2: Cas Klybeck, Bâle. Coupe hydrogéologique le long du chemin de halage.

Après une nouvelle pollution (9.12.1974), dégageant une odeur d'essence exceptionnellement forte à l'embouchure de la Wiese, on ordonna le creusement de 2 autres tranchées (9 et 10). Dans les deux, on pouvait déceler de l'huile minérale sur la nappe. Pour déterminer l'extension de la pollution, on creusa plus tard encore les tranchées 11 et 12 dont le résultat fut négatif.

A la suite d'une visite des installations de la région surveillée, on décela le 4.2.1975 une perte dans une canalisation peu profonde sous le chemin de halage entre l'ascenseur et les réservoirs. Ainsi fut précisé un point de pollution.

Les résultats acquis par les recherches montraient que le terrain de l'aire comprise entre le chemin de halage et la digue de la Wiese était par endroits fortement pollué par des huiles et des produits chimiques et que la nappe phréatique était couverte d'une couche d'huile minérale épaisse de près de 25 cm, dont l'extension pouvait être délimitée à peu près par les tranchées de recherche. L'extension de la pollution dans le port rhénan de Klybeck s'étalait sur un demi-cercle d'environ 110 m de rayon, dont une surface d'environ 20.000 m². Sur environ 2.500 m² à l'intérieur de cette surface, l'épaisseur était de 20 cm en moyenne, tandis que vers l'extérieur, la couche était épaisse de 10 cm en moyenne. Avec une porosité moyenne de 15-20 % et en supposant que les vides soient remplis d'huile à 50 %, on peut estimer la quantité d'huile infiltrée vers 200 m³ au maximum.

Les analyses de laboratoire obligent à conclure qu'il existe probablement plus d'un point de pollution. La mesure des niveaux respectifs de la couche de l'huile et de celui de la nappe, le 29.11.1974, montra dans le sondage 5 une surélévation de 3 resp. 4 cm par rapport à 5 et 6. Il faut interpréter ce faible relèvement en admettant un apport de fuel par infiltration à partir de la surface du sol (fig. 4.2).

La perte découverte le 4.2.1975 dans la canalisation recoupant le chemin de halage entre les sondages 5 et 6 permettait de localiser le foyer de pollution dont l'existence avait été soupçonnée au voisinage et d'évaluer les pertes à environ 0,42 m³/h. En 24 heures, cela représente une perte d'environ 10 m³.

L'huile trouvée dans plusieurs sondages et y surnageant sur une certaine épaisseur a été d'abord aspirée à plusieurs reprises par pompage. Jusqu'au 28.1.1975 on a ainsi pu récupérer 22 m³ de fuel. 3 m³ de plus furent récupérés jusqu'en novembre 1975.

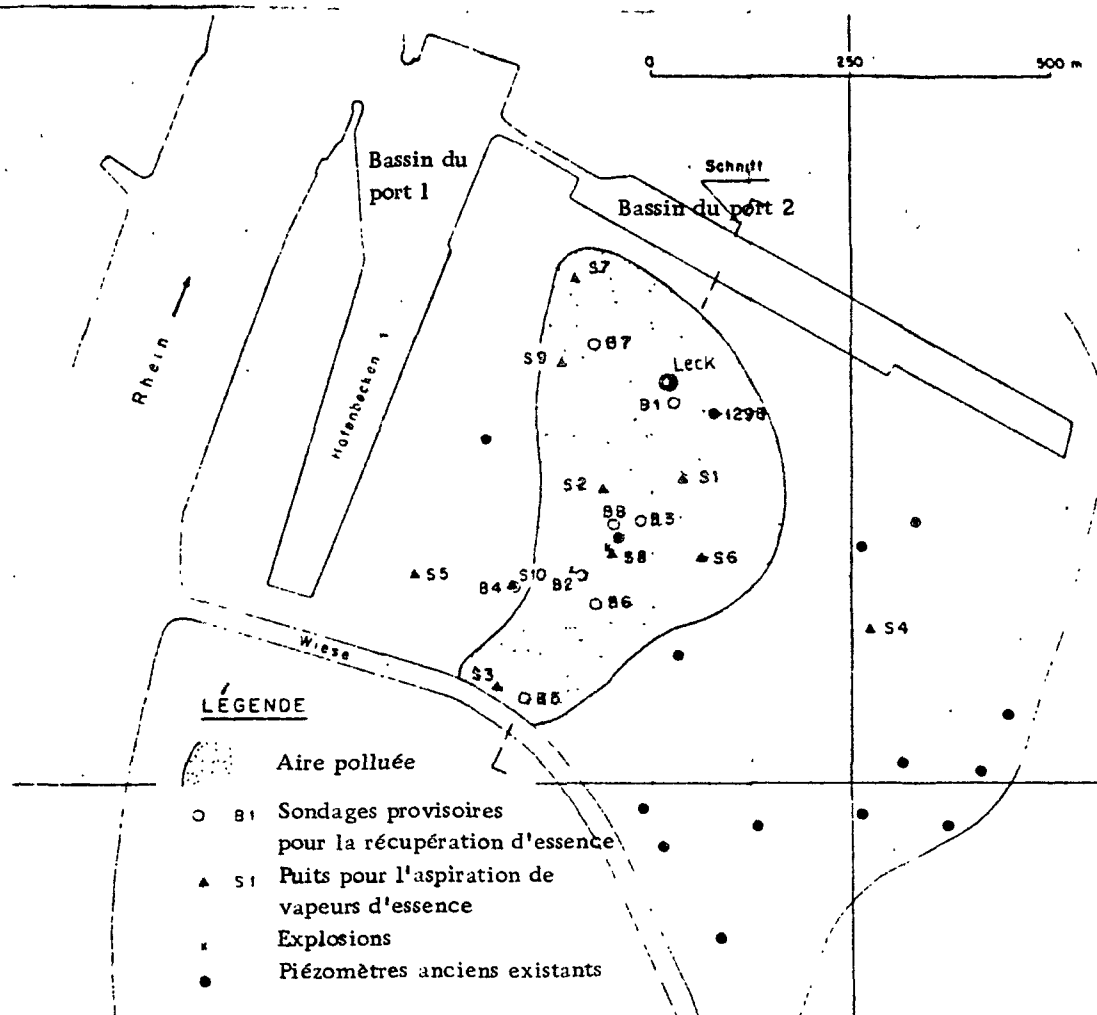
Du 20.12.1975 au 19.5.1976, dans une deuxième phase d'assainissement, 5 puits ont été creusés à l'intérieur de l'aire la plus polluée et équipées de pompes immergées destinées à abaisser la nappe phréatique et de flotteurs pour écumer l'huile. Au rythme de 16 l/s, la nappe fut abaissée de 50-60 cm dans les puits. Pendant ce temps 7,7 m³ d'huile furent récupérés; finalement la masse d'huile récupérée s'élevait à 32,7 m³.

Aucune huile ne surnageait plus dans les puits à la fin de cette phase d'assainissement. Mais il faut estimer que les résidus polluants d'huile sont de l'ordre de 5 à 30 m³. La plus grande partie de l'huile perdue, 150 m³ peut-être, s'est écoulée durant au moins 4 mois avec l'eau de la nappe dans le Rhin; cela est dû surtout au retard apporté à la mise en oeuvre des travaux d'assainissement.

Cas 2 : Kleinhüningen, Bâle (Fossé rhénan)

A proximité du port rhénan Kleinhüningen (fig. 4.3) une usine de craking d'essence était en fonction en 1972. D'importantes quantités d'essence ont pu s'échapper de la conduite d'amenée entre les réservoirs et l'usine et ce longtemps avant que l'on ne s'en rende compte. Ultérieurement cette quantité fut évaluée à 600 t (900 m³).

Cette situation fut découverte à la suite d'explosions s'étant produites dans deux caves lors de l'allumage des interrupteurs électriques ; on avait remarqué des vapeurs d'essence dans des puits et des odeurs d'essence dans les tranchées d'un système de chauffage commun.



Fir. 4.3 : Cas Kleinhüningen, Basel. Lage der Leckstelle und Verbreitung des Leichtbenzins.

Ainsi apparut l'obligation de délimiter l'extension de l'essence dans le sous-sol, d'éviter le danger d'explosion par les vapeurs d'essence et d'enlever l'essence du sous-sol.

Le sous-sol des environs du port de Kleinhüningen présente la structure géologique suivante (fig. 4.4). En surface les remblais artificiels d'anciens bras morts du Rhin sont très étendus. Au-dessous se trouvent les graviers du Rhin, grossiers avec $\pm$ de sable, très perméables à l'eau. Ils sont épais de 12 m environ. Le sous-sol, imperméable, est formé par les argiles du Rupélien (marnes à septaries-argiles bleues).

Les aux souterraines circulent dans les graviers; elles se dirigent vers le Rhin; mais à proximité du Rhin le niveau est à peine incliné. Au repos, son niveau se situe vers 6-6,5 m sous la surface du terrain. Les bassins portuaires avoisinants et l'embouchure de la Wiese sont à l'intérieur des eaux retenues pour la centrale de Kembs et ont une influence directe sur le niveau d'eau de la nappe phréatique. Pour abaisser artificiellement le niveau de la nappe, on a aménagé un canal de drainage lors de la construction de la centrale de Kembs; mais il n'a jamais été mis en service car le niveau de l'eau ne s'est pas relevé dans la mesure prévue; mais il a été barré par la nappe.

L'essence a un poids spécifique de 0,655 et est très fluide. Dès le début on a donc dû prévoir une grande extension de la pollution. Et en effet, plus tard, on a pu constater qu'une aire d'au moins 5 ha était polluée.

L'essence présente aussi un coefficient d'évaporation élevé. Pourtant les vapeurs d'essence sont plus lourdes que l'air; dans la mesure où il n'y a pas de perturbations, elles s'accumulent dans les pores des graviers. Une fois atteinte la vapeur saturée, l'évaporation de l'essence est stoppée. La densité des constructions du terrain a empêché l'échange avec l'atmosphère de sorte que les vapeurs d'essence se sont répandues dans les caves ouvertes vers le bas et y ont formé des mélanges explosifs.

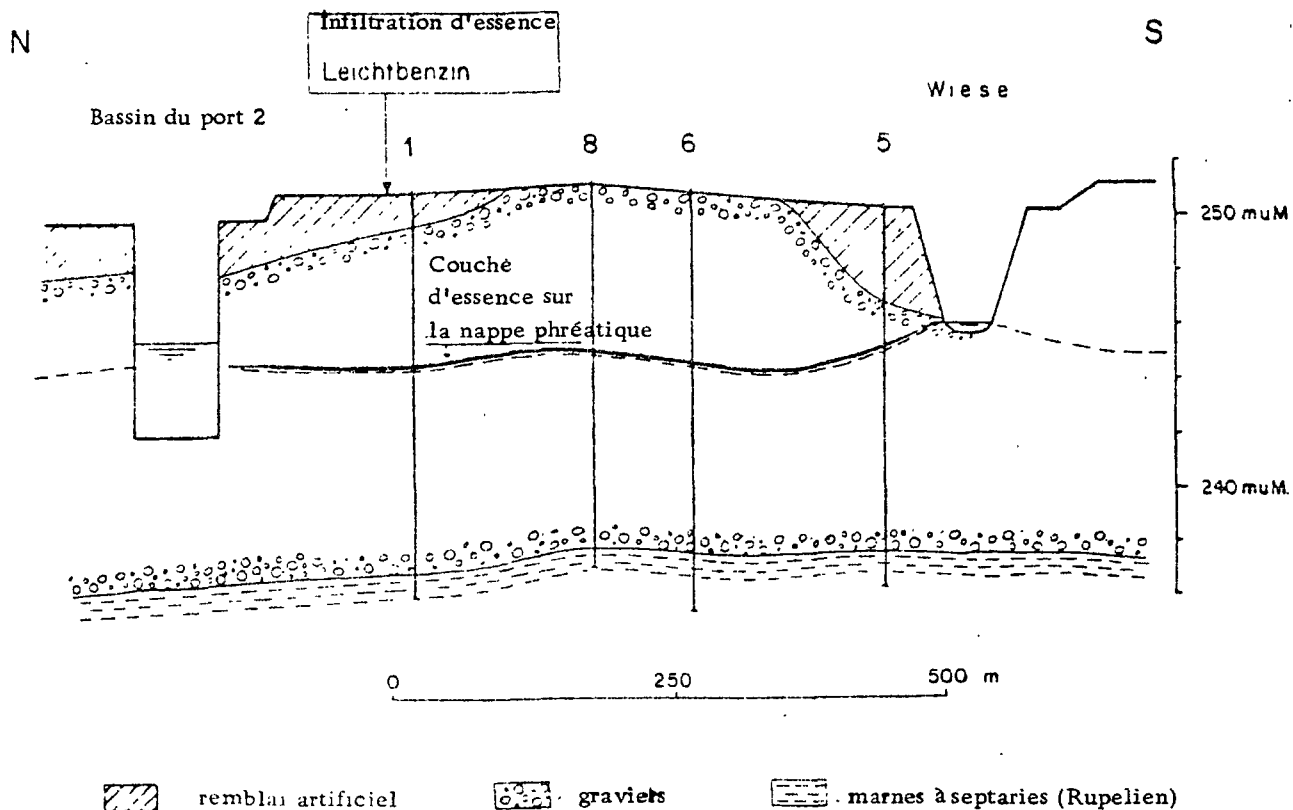


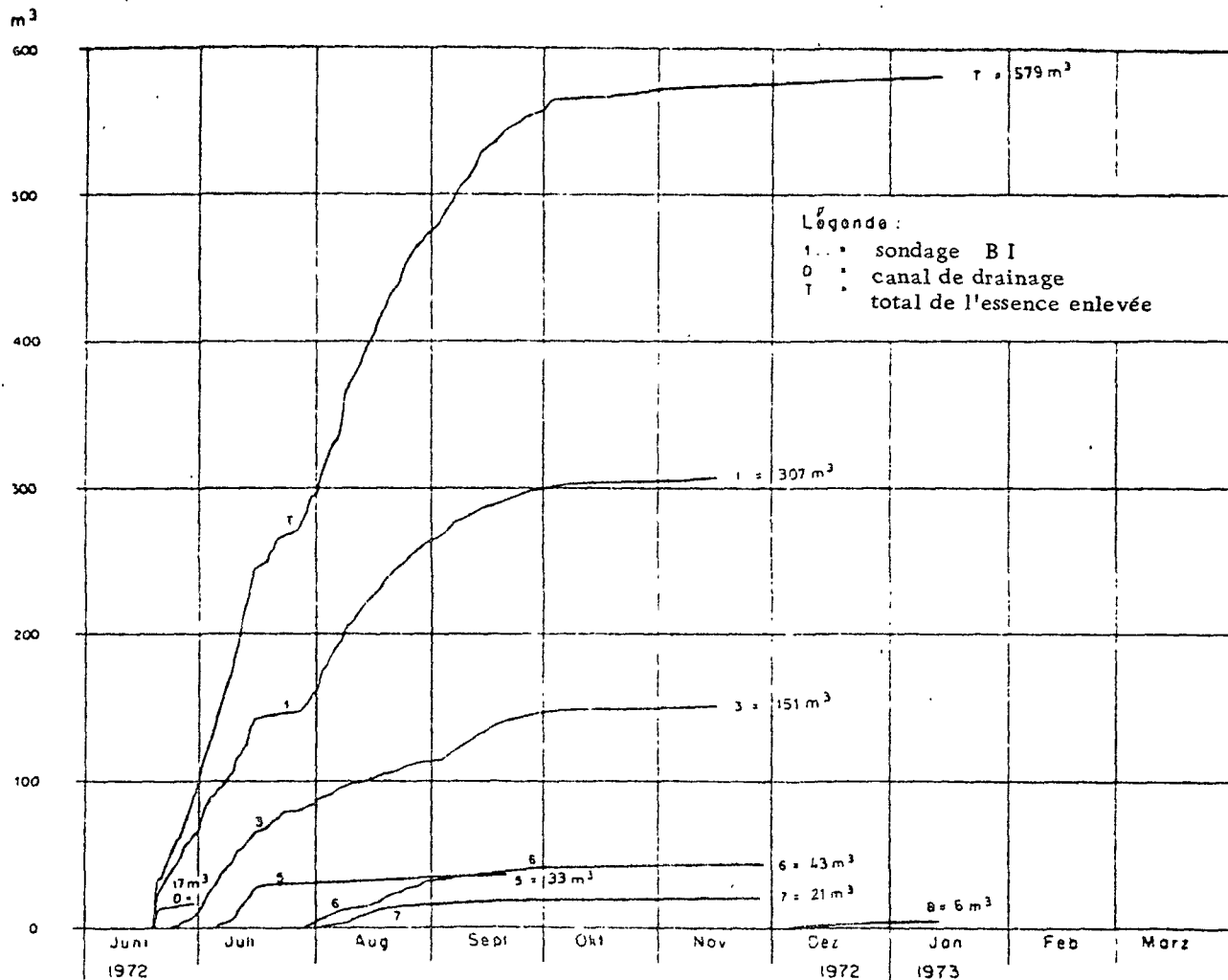
Fig. 4.4 : Cas Kleinhüningen, Bâle. Coupe géologique à travers l'aire polluée.

Etant donné qu'un puits était en fonction au voisinage des pertes (1298), par ce chemin l'essence a été introduite dans la canalisation. Celle-ci débouchait dans le Rhin près de l'embouchure de la Wiese. D'importantes quantités d'essence y furent retenues, grâce au refoulement des eaux du Rhin elles surnageaient dans les tuyaux du canal. Après mise hors service du puits, l'essence n'apparaissait plus dans la canalisation.

Comme mesures spécifiques d'assainissement, on exécuta les travaux suivants :

- Flambage des vapeurs d'essence dans les canaux et lavage des canaux. Pour cela on a dû enlever les bateaux amarrés à l'aval de l'embouchure de la Wiese.
- Lors des niveaux d'étiage de la nappe, il était possible que de l'essence ait pénétré dans le canal de drainage de Kleinhüningen. Celle-ci a été enlevée par le groupe spécialiste des sapeurs-pompiers de Bâle.
- A titre de mesures immédiates et complémentaires, pour éviter d'autres explosions, on a creusé 9 autres puits par soufflage pour élever les vapeurs d'essence. L'efficacité de cette mesure n'est pas certaine : dans 7 sur 9 de ces puits des vapeurs d'essence furent décelées; par ce procédé, il ne semble guère possible de renouveler l'air des pores sur une aire de 5 ha. Il faut ajouter que les vapeurs d'essence ont dû être évaluées dans l'air. De toutes façons, d'autres explosions ne se sont pas produites.
- L'essentiel de l'assainissement résidait dans les donages atteignant la nappe phréatique et dans les pompages créant des entonnoirs de dépression dans lesquels l'essence fut enlevée à intervalles réguliers (fig. 4.5). Au total 9 sondages ont été réalisés. Ils ont été en service en partie de juin 1972 à mars 1973. A partir de janvier 1973 les quantités d'essence étaient partout si faibles qu'il était impossible de les séparer.

Les conditions ultérieurement constatées dans cette région ont montré que l'assainissement a été une pleine réussite. Il n'est guère possible de chiffrer la quantité d'huile minérale récupérée, car il est impossible d'estimer la portion évaporée. Mais il peut être admis que 420 t (645 m³) au moins ont été enlevées.

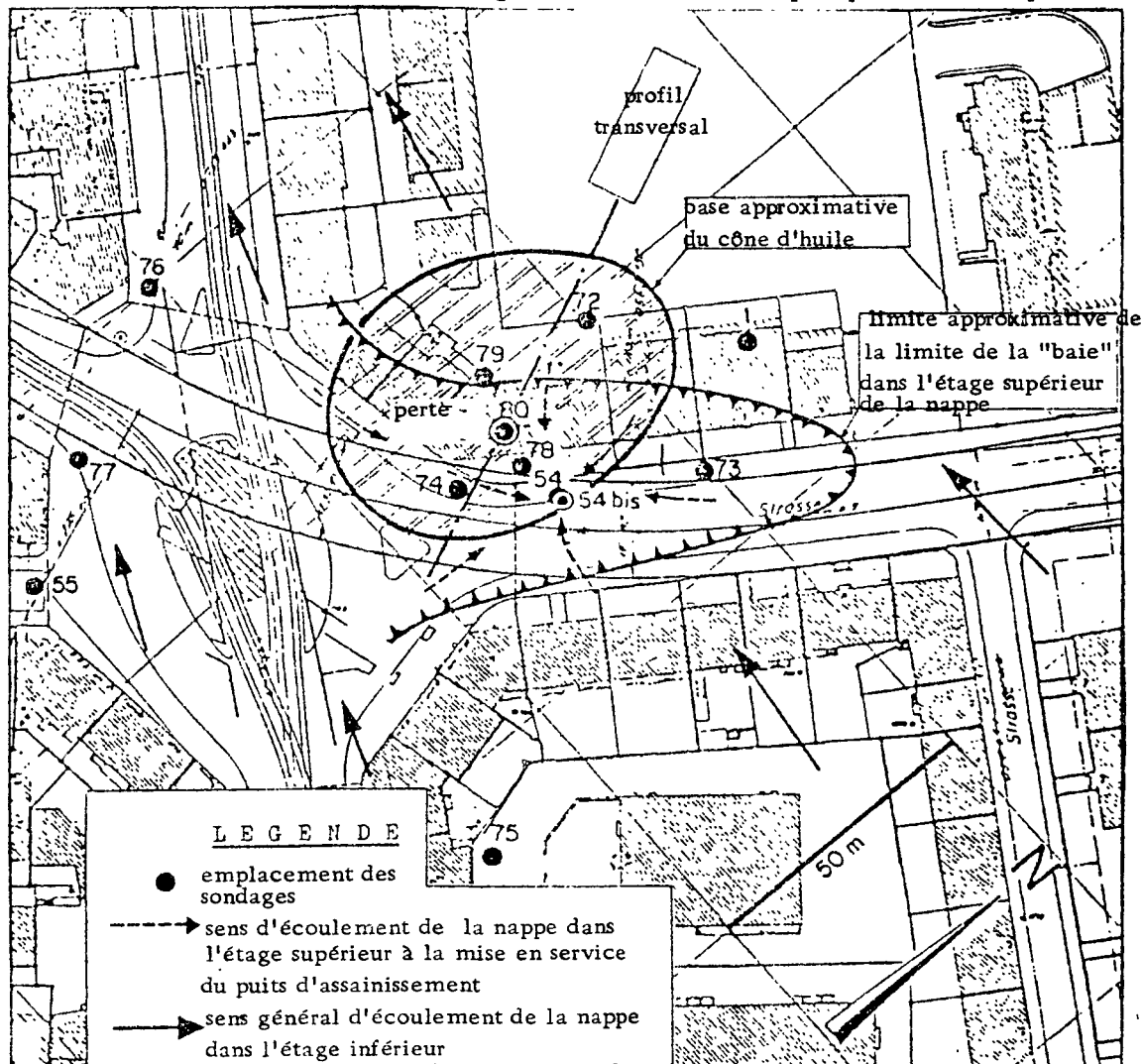


Ca Fig. 4.5 : Cas Kleinmünchen, Bâle. Récupération d'essence.

Cas 3 : Zürich (Suisse)

La première indication concernant la présence de fuel dans le sous-sol résultait d'une mesure de routine du niveau de la nappe phréatique faite en avril 1972 dans le piézomètre 4 1/2" n° 54 (fig. 4.6). On y constata, au-dessus du niveau d'eau situé à la profondeur de 13 m la présence d'une couche d'huile épaisse de 2 décimètres. Pour préciser les causes et l'extension de la flaque d'huile, il ne pouvait être question, en raison de la présence de constructions, que de sondages et même ceux-ci étaient difficiles à placer à cause de l'existence de nombreuses canalisations souterraines. De même, pour l'assainissement, il fallait se contenter de pompages, car l'exécution de tranchées était exclue. En l'espace de 4 ans, on a foré un puits et 10 sondages légers qui furent tous équipés de piézomètres PVC de 4-55" de diamètre. En même temps, la position du niveau de la nappe fut mesurée périodiquement (entre autres en vue de déterminer le sens d'écoulement); l'huile apparaissant en divers trous de sondage fut enlevée régulièrement après relevé de son épaisseur. A l'aide du puits d'assainissement 54 bis, déjà creusé en 1972, en prélevant au cours de la période d'assainissement (1972-1979) une quantité Q d'environ 8,3 l/s, on a créé dans la surface de la nappe un entonnoir de dépression destiné à empêcher une propagation de l'huile la surnageant.

Un contrôle sévère de tous les réservoirs d'huile des proches environs ne permit pas d'abord de déceler aucune perte. Enfin, en juin 1974, on a pu découvrir sous le sol bétonné d'une chaufferie un tuyau d'amenée d'huile défectueux qui, après confrontation des autres résultats de l'analyse, fut reconnu comme étant la cause de la pollution d'huile. La conduite fut réparée de suite; mais les quantités d'huile récupérées dans les trous de sondage ne diminuèrent qu'après un temps assez long.



Le lieu de l'accident est situé dans le domaine du cours d'eau souterraine très utilisée de la vallée de la Limmat. Une couche irrégulière de limon située dans les graviers aquifères sépare dans la partie supérieure de ces graviers un étage supérieur d'eau peu épais formant en cet endroit une sorte de baie drainée en direction SW vers le courant principal situé plus bas. La pollution n'affectait que l'étage supérieur et a apparemment pu être retenue à l'intérieur de la baie signalée.

Quelques-uns des sondages rencontraient à des profondeurs variables, à peu de mètres au-dessus du niveau de la nappe, des matériaux imbibés d'huile (gravier sableux). Les points ainsi reconnus pouvaient être groupés dans une surface conique dont la pointe se plaçait près de la perte signalée et dont la base était formée par le niveau de la nappe phréatique (fig. 4.7). La hauteur du cône atteignait environ 10 m, le diamètre de la base devait avoir un peu plus de 50 m. En direction Nord le cône d'huile dépassait le bord de la baie d'eau souterraine; il y reposait sur les limons "secs". En direction Sud-Est, c.à.d. au-dessus de la nappe, le point extrême fut localisé près du sondage 54; une phase d'huile y reposait encore sur l'eau, mais il n'y avait que peu de traces d'huile dans les matériaux sus-jacents. Les variations annuelles du niveau de la nappe, atteignant 1 à 2m, ont sans doute contribué à l'effacement du bord de la nappe. Dans les sondages plus éloignés, on n'a constaté aucune phase d'huile ni aucune trace d'odeur.

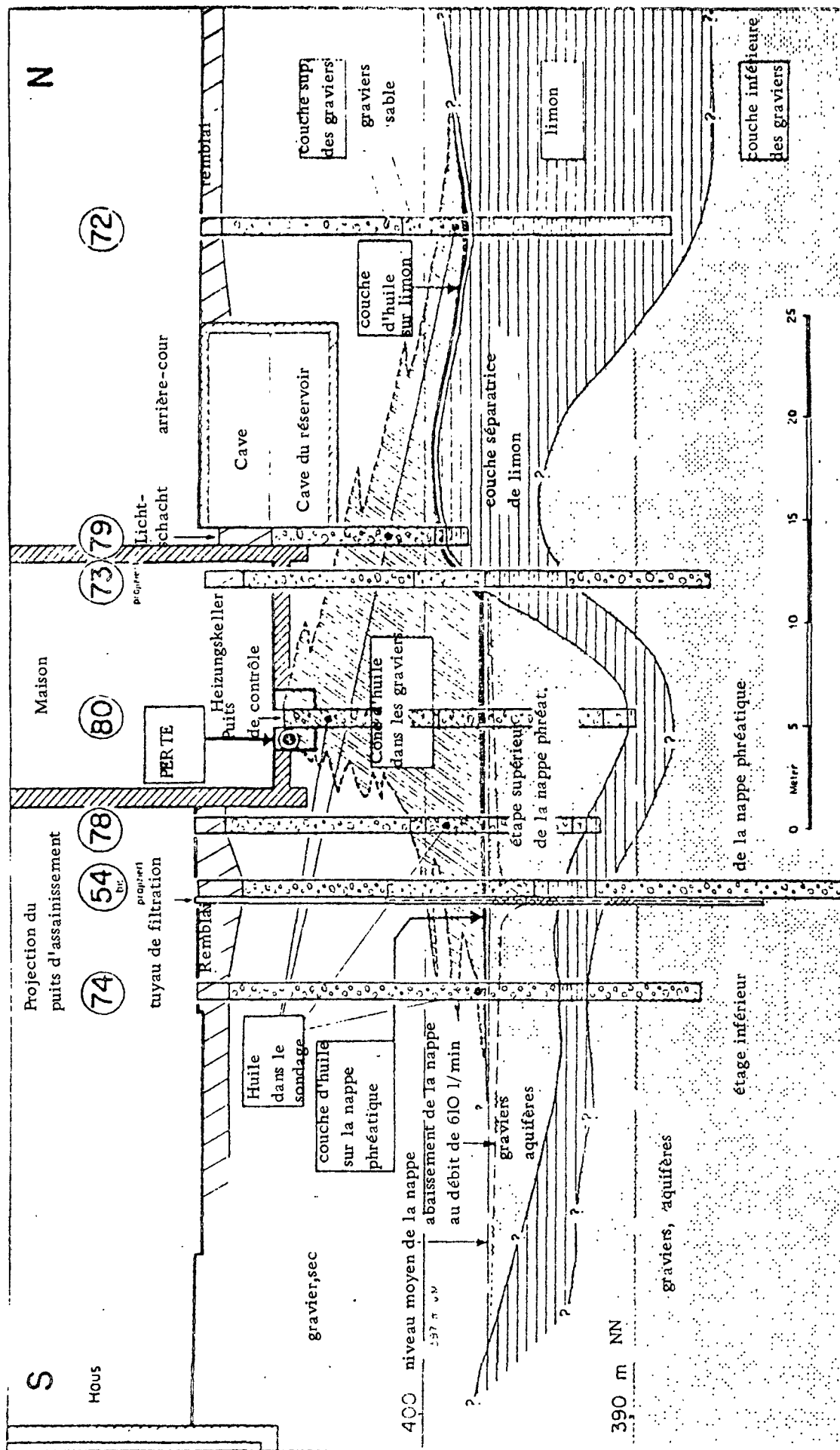


Fig. 4.7 : Cas Zurich. Coupe hydrogéologique (profil transversal)

A la suite du pompage cité plus haut et de l'aspiration de l'huile dans les piézomètres, il a été possible de combattre efficacement l'extension de l'huile sur la nappe; l'imprégnation à l'intérieur du cône d'huile n'a pu être ramenée à la saturation résiduelle que par la suppression des arrivées et à la suite par un très lent égouttement.

15 échantillons prélevés dans les matériaux de l'intérieur des sondages ont été analysés sur leur teneur en huile. Les valeurs se situaient souvent entre 7 et 10 l par m^3 de matériaux. A la pointe du cône et près du niveau de la nappe phréatique, on a trouvé des concentrations plus élevées, de l'ordre de 30-50 l/ m^3 . La perte avait déjà été colmatée depuis 14 à 18 mois à l'époque des prélèvements (août à décembre 1975). Les dimensions du cône et les concentrations constatées ont permis d'évaluer la teneur en huile du cône à cette époque vers environ 30 à 50 m^3 .

Il est intéressant de noter l'effet des porosités différentes des matériaux sur la production d'huile des sondages n° 72 et n° 74. Le premier a traversé surtout des sables (valeurs k_f de l'ordre 10^{-5} à 10^{-4} m/s), le second a traversé des graviers (valeurs k_f de l'ordre 10^{-3} m/s). Dans le sable on a souvent mesuré une couche exceptionnellement épaisse d'huile (p. ex. 25 cm le 15.1.1976); mais lors de l'aspiration le tuyau était rapidement vidé de son huile. Dans les graviers, les couches d'huile étaient moindres (p. ex. 4,5 cm le 15.1.1976), par contre lors de l'aspiration, on observait des arrivées continues et de plus longue durée de l'huile.

Jusqu'en automne 1975, à des intervalles réguliers de 1 - 2 semaines, une voiture spéciale procédait à des aspirations; plus tard, en raison des faibles venues d'huile, elle ne les faisait plus que sporadiquement. Au début, le puits d'assainissement, resp. le sondage voisin n° 54, permettaient de récupérer le plus d'huile, environ 50 à 100 l; plus tard, le rendement d'huile baissait dans le cône de dépression, tandis que les tuyaux placés plus près du centre du cône d'huile fournissaient de l'huile en moindre quantité mais pendant une plus longue durée. L'huile ainsi récupérée jusqu'en automne 1979 était de 7,9 m^3 , irrégulièrement répartis dans le temps. Voir les détails dans la fig. 4.8.

A ces quantités d'huile aspirées à la surface de la nappe, il faut ajouter une plus faible quantité, difficile à évaluer, qui fut évacuée avec l'eau de la nappe pompée dans le puits d'assainissement lors de la formation du cône de dépression. Au début, la teneur en huile enlevée par pompage oscillait beaucoup selon l'époque et la profondeur de la nappe. Le 3.7.1972 on a mesuré 0,15 mg/l, le 23.1.1973 par contre, 2,46 mg/l. En général, elle se situait au-dessous du seuil perceptible à l'odeur. Si, pour toute la durée du pompage, de 1972 à 1979, on l'estime à la valeur moyenne probablement trop élevée de 0,7 mg/l, en tenant compte du débit des pompes, on obtient 1,1 m^3 d'huile. Ainsi on aurait récupéré au total $7,9 + 1,1 = 9 m^3$ d'huile.

Le 5 juin 1974, après des essais de pression, une tache d'huile fut constatée sur le sol devant la chaufferie. La mise à nu d'une conduite montre ensuite qu'une fine fente dans un joint pouvait être considérée comme étant la cause des pertes d'huile. Malgré des investigations étendues, aucune autre perte ne fut décelée, même dans les installations voisines. Les circonstances entraînaient des divergences de vue sur l'importance des pertes pour un aussi petit défaut. On établit donc un diagramme des temps d'achat d'huile dans l'intervalle 1970 à 1977. On peut admettre que sur une aussi longue durée les achats sont égaux à la consommation d'huile. Les différences dues aux conditions atmosphériques s'annulent en quelques années.

La construction des courbes moyennes d'achat d'huile fournit une nette différence pour les périodes 1970/1974 et 1974/1977. Pour la première période, les achats étaient en moyenne de 44 m^3 /an; après la réparation du défaut constaté le 5.6.1974, ils s'abaissaient vers 30 m^3 /an; une différence d'environ 14 m^3 /an. En admettant que les surplus d'achats ont remplacé les pertes, il en résulte que durant la première période plus de 50 m^3 de fuel se sont infiltrés dans le sol. Dans une installation voisine aucune différence ne fut constatée dans les achats et dans la consommation.

Pour être complets, notons que les constatations rapportées ici ont été contestées pour l'essentiel par l'entreprise concernée et que, dans une procédure en cours d'autres explications scientifiques ont été demandées.

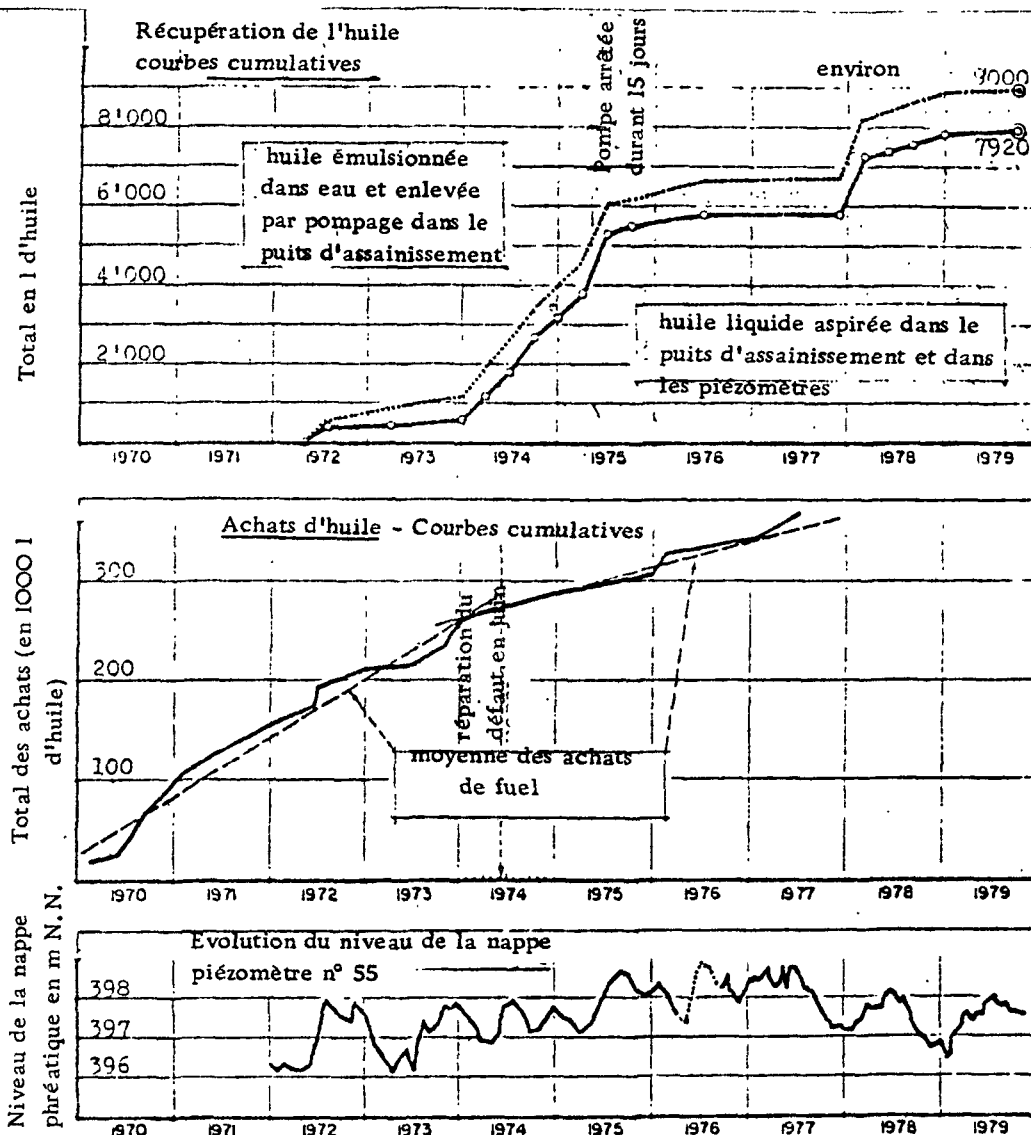


Fig. 4.8 : Cas Zurich : récupération de l'huile, achats d'huile, évolution de la nappe.

Cas 4 : Niederhasli (Suisse)

Sur la figure 4.9 sont représentées les conditions locales d'une façon schématique et simplifiée du dépôt "Frévlig" à Niederhasli, canton Zurich. L'attention est attirée sur le fait que pour faciliter une vue d'ensemble on n'a représenté que le réservoir du dépôt dans lequel la perte d'huile a été constatée. Tous les autres réservoirs du triangle de voie ferrée ont été omis.

A la suite de l'ouverture malveillante du robinet d'écoulement d'un réservoir surélevé plein, ayant une capacité de 5.000 m³, environ 260 m³ de fuel EL se sont écoulés dans la nuit du 19 au 20 juin 1967 et qui se sont répandus sur environ 60 % de la surface du bassin, et qui se sont infiltrés dans le sous-sol graveleux non étanche du bassin. Le 20 juin on a seulement pu récupérer environ 10 m³ de fuel en surface.

Le dépôt des réservoirs est situé en bordure d'un bassin glaciaire d'âge wurm. La région accidentée et ses environs éloignés montrent une structure géologique très hétérogène.

La figure 4.10 représente une coupe hydrogéologique entre le dépôt des réservoirs et le captage d'eau de Niederhasli, situé 400 mètres plus bas dans le sens d'écoulement de la nappe. Le sous-sol est formé surtout de moraine peu perméable, de graviers et de limons entre lesquels s'intercalent, en partie par étages, des graviers sableux très perméables. Ces derniers sont très aquifères, tandis que les autres couches forment plus ou moins barrage à la nappe phréatique.

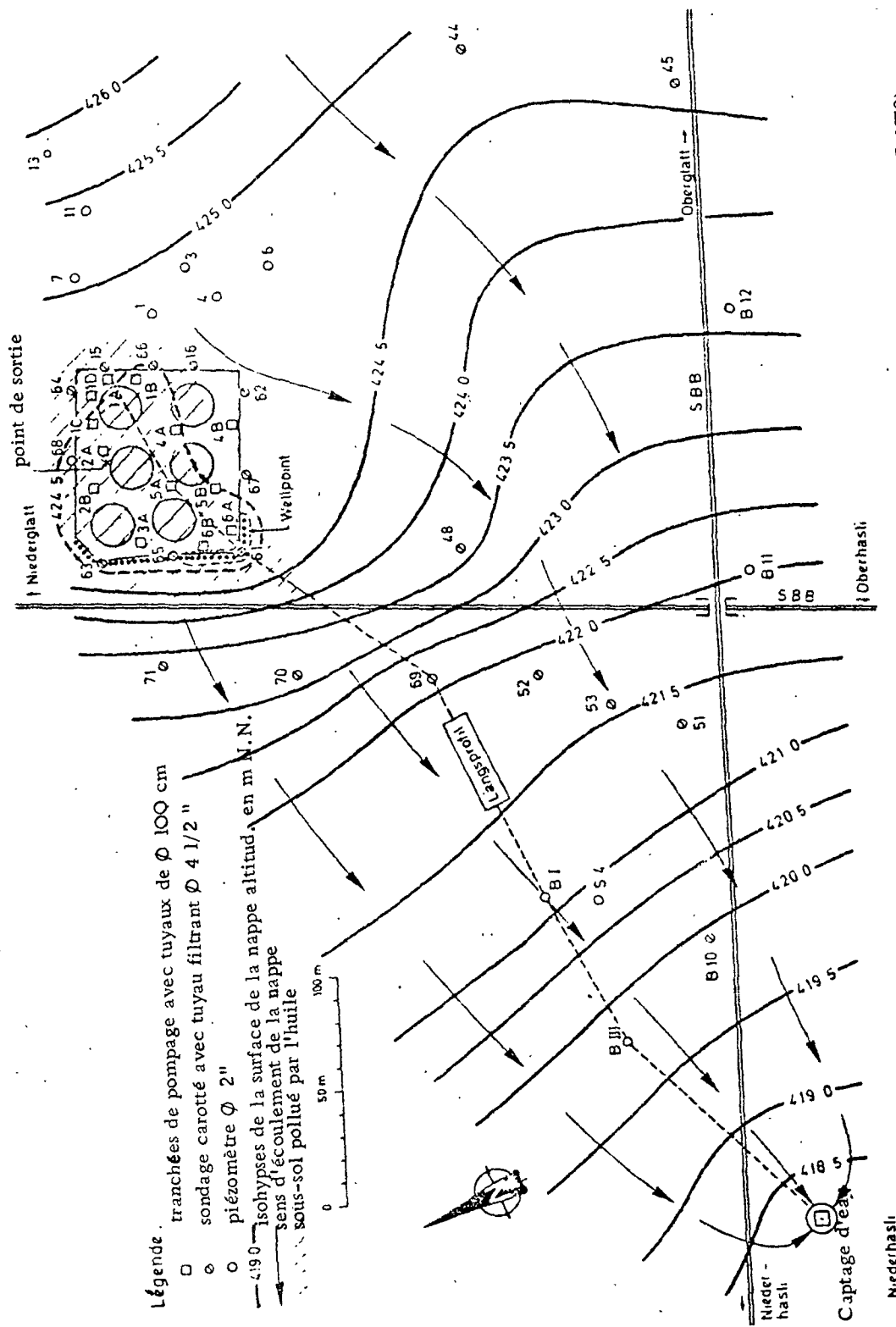
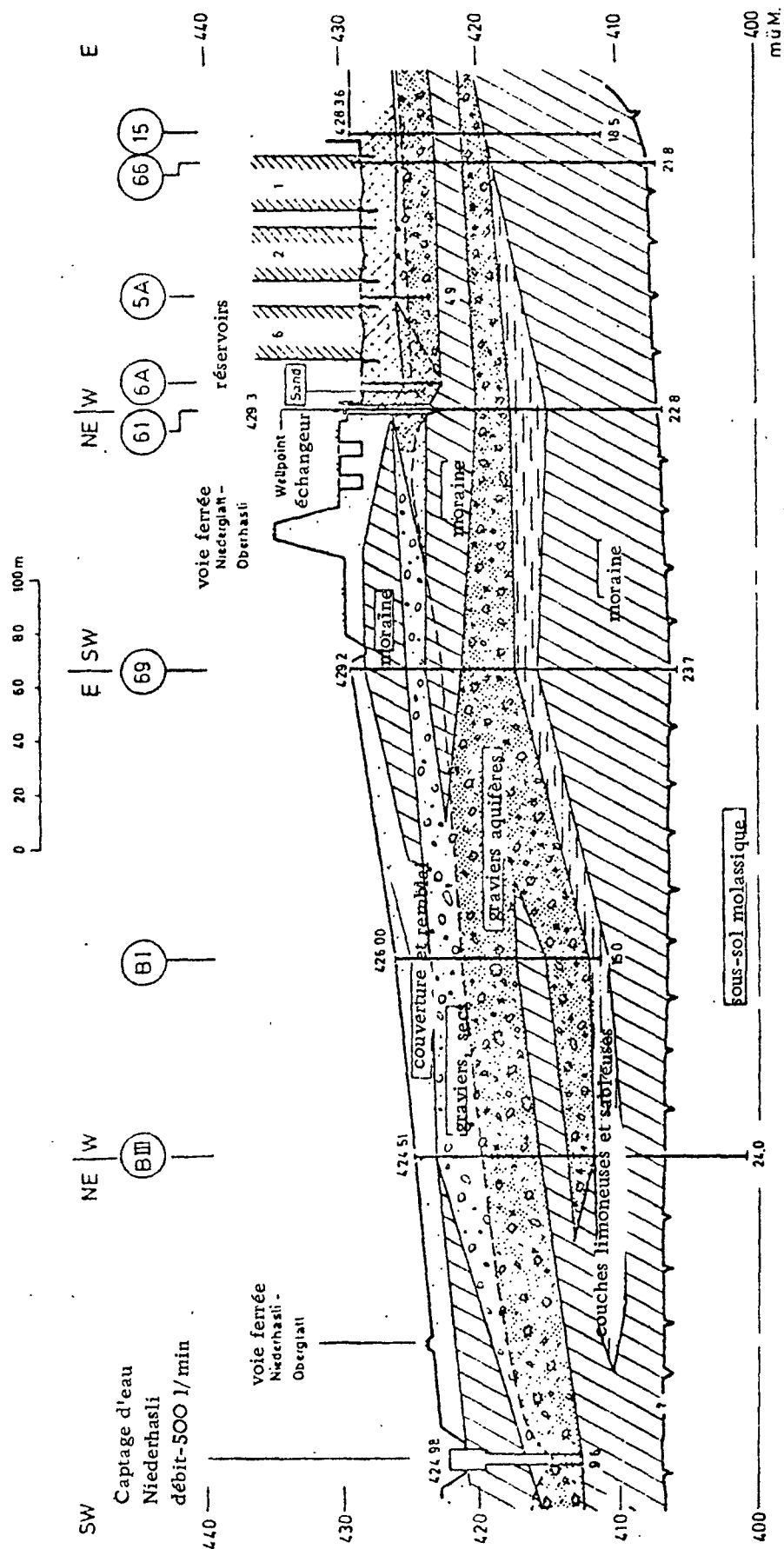


Fig. 4. 9 : Cas Niederhasli. Plan de situation avec représentation du niveau de la nappe phréatique (10. 5. 1979)



Niveau de la nappe phréatique rhénane from 10.5.1979
Sol pollué par l'huile
Fig. 4.10 : Cas Niederhasli : Coupe longitudinale hydrogéologique.

La représentation des isohypses du niveau de la nappe phréatique (fig. 4.9) montre que l'aire polluée est située dans le bassin d'alimentation immédiat du captage de Niederhasli. La surface de la nappe est située à environ 3,50 m de profondeur lors de la fonte des neiges au printemps, à environ 5 m en automne. La pente de la nappe est, en raison de l'hétérogénéité du sous-sol, très irrégulière; elle oscille entre 7 et 16/1.000. L'imperméabilité des graviers aquifères est de même variable, les valeurs oscillent entre 1.10^{-3} et 5.10^{-5} m/s.

Comme mesure immédiate on a creusé à l'intérieur des bassins des réservoirs à l'aide d'une benne-auto 13 tranchées de sondage (n° 1 à 6B de la fig. 4.9) d'une profondeur maxima de 6 mètres qui furent équipées de tuyaux perforés de 100 cm de Ø. Les tranchées, situées dans les graviers perméables et dans lesquelles de l'huile récupérable s'était amassée sur la nappe (p. ex. : 1 mètre environ d'huile le 21/6/1977 dans le tuyau de filtration n° 15) ont été équipées de suite de pompes et le mélange huile/eau fut directement déversé dans des citernes de train. Ultérieurement on y intercala deux séparateurs d'huile par gravité et on enleva par pompage seulement l'huile ainsi récupérée.

L'aide de sondes flottantes installées dans les puits, l'installation de sondage a pu être entièrement automatisée. Lors du pompage intermittent, on a pu, selon la position de la nappe, pomper en moyenne 50-150 l/min d'huile et d'eau.

Pendant le creusement des puits d'assainissement à l'intérieur de l'enceinte du bassin des réservoirs, on a foré en dehors 8 sondages carottés jusque sur le sous-sol molassique (n° 61-68) qui furent équipés de tuyaux filtrants de Ø 4 1/2". Ces tuyaux ont servi à contrôler l'extension de l'huile et temporairement dans quelques cas comme puits d'assainissement.

Pour pouvoir surveiller une extension possible de la phase huile dans les hydrocarbures dissous dans l'eau ou dans leurs produits d'altération (zone de réduction) en direction du captage de Niederhasli, on a complété les tuyaux de contrôle déjà existants par 3 autres sondages (n° 69, 70 et 71) et on les a aussi équipés de tuyaux filtrants de Ø 4 1/2". Des échantillons d'eau y furent prélevés à intervalles réguliers et analysés chimiquement.

Pour éviter si possible une extension de l'huile en direction du captage Niederhasli, on a en avril 1978, à titre de précaution complémentaire, créé une installation de pompage le long du mur d'enceinte avec drains horizontaux longs de 7 m et distants de 2 m. Dans l'équipement ainsi réalisé, l'ouverture d'aspiration est située dans un tuyau filtrant en plastique qui (en réglant les soupapes des bêtes de drains) permet d'aspirer l'huile surnageant sur la nappe phréatique.

Les précautions ainsi prises contre l'écoulement de l'huile ou des hydrocarbures dissous en direction Ouest ont permis dans la suite de fermer l'un après l'autre les tranchées de pompage à l'intérieur du bassin et d'entreprendre son isolation en automne 1978.

La partie hachurée de la fig. 4.9 représente l'extension probable de l'huile. Il en résulte de façon surprenante que, malgré les quantités importantes infiltrées, l'huile ne s'est que peu étendue latéralement en dehors de l'aire du bassin. Cela peut être dû aux deux causes principales suivantes :

- récupération de grandes quantités d'huile dans les tranchées de pompage à l'intérieur du bassin des réservoirs;
- présence du côté Ouest de couches sableuses peu perméables et dans l'angle Sud de couches argileuses qui ont empêché ou du moins fortement ralenti l'écoulement de l'huile dans le sens de la pente de la nappe.

On a pu récupérer dans les tranchées de pompage mises en services successivement fin juin 1977, d'abord 2.000 l/jour, mi-juillet environ 1.000 l/jour, fin juillet environ 500-800 l/jour et fin septembre encore 200-300 l/jour, représentant dès lors un volume total de 115 m³. Fin septembre, après abaissement de la nappe, l'huile enlevée était réduite à 70 l/jour; en novembre, après relèvement de la nappe, elle remontait à environ 130 l/jour.

Ces bons résultats ont permis de lever en mai 1979 la suspension préventive du fonctionnement de la station de pompage de Niederhasli qui avait été ordonnée par les autorités suite au déversement accidentel d'hydrocarbures.

Afin d'empêcher dans l'avenir une pollution semblable de l'eau souterraine, l'aire de stockage avec ses six réservoirs aériens a été rendue étanche par un revêtement bitermineux résistant à l'huile, en automne 1978, ceci conformément à la législation suisse sur la protection des eaux.

Avant ces mesures d'étanchéisation, les couches supérieures du terrain, qui étaient le plus contaminées par l'huile, ont été excavées jusqu'à environ 50 cm de profondeur, transportées sur un dépôt offrant toutes les garanties pour des terres imprégnées d'huile et remplacées aussitôt par du gravier propre. Une excavation plus profonde ne pouvait pas être entreprise par suite des risques encourus pour la stabilité des réservoirs pleins. Le matériau excavé représentant un volume de 2.700 m³ présentait selon les analyses effectuées une teneur en huile de 10,7 l/m³ environ, ce qui correspond à une quantité d'huile de 29 m³.

L'assainissement de cet accident d'hydrocarbures de juin 1977 peut être considéré après deux ans et demi comme largement achevé. L'installation complémentaire Wellpoint reste maintenue en état de fonctionner et l'analyse chimique d'échantillons d'eau est poursuivie à intervalles réguliers.

Le coût total des mesures d'assainissement mises en oeuvre afin de protéger l'eau souterraine se monte jusqu'à fin janvier 1980 à environ 1 million de francs, sans tenir compte de l'étanchéisation de l'aire de stockage.

En février 1978, environ 8 à 10 l/jour étaient encore pompés dans les puits. Jusqu'au milieu de ce mois, une quantité totale de 130 m³ a été récupérée. Au cours du printemps et de l'été 1978, la quantité d'huile récupérable continuait à diminuer si bien que l'on a progressivement démonté les installations de pompage et que les puits ont pu être remblayés en même temps que l'aire de stockage a été rendue étanche.

A partir de l'installation complémentaire Wellpoint, mise en route au printemps 1978, 5 litres d'huile ont été soutirés par jour au début. Jusqu'à fin 1979, cette quantité s'est réduite à 0,3 l/jour et le pompage a été diminué en conséquence. Le démontage de l'installation est prévu pour le printemps 1980. Le débit d'eau moyen pompé était d'environ 50 l/minute.

En se fondant sur l'extension constatée de l'huile, on peut estimer à environ 20.000 m³ le volume de terrain plus ou moins fortement imprégné, si bien que la quantité d'huile résiduelle, non récupérable par pompage peut être globalement estimée à 80-120 m³, en admettant une capacité résiduelle de 4 à 6 l/m³.

Il est surprenant de noter que, depuis le début des contrôles chimiques, en été 1977, jusqu'à fin 1979, aucune variation de la chimie de l'eau souterraine n'est apparue dans les piézomètres d'observation à l'ouest de la voie ferrée, c'est-à-dire en aval du lieu de déversement accidentel. L'eau souterraine présente seulement dans les tubes 69 et 70 certains signes de réduction par suite de sa faible teneur en oxygène, mais ceci était probablement déjà le cas avant l'accident décrit ici. Plus loin, en aval, l'eau souterraine était et est aussi fin 1979 de bonne qualité et présente, par exemple, un taux de saturation en oxygène de 60 à 80 %. Dans l'eau souterraine, des hydrocarbures dissous n'ont été trouvés nulle part à l'ouest de la voie ferrée, à des teneurs de l'ordre du ppm.

Cas 5 : Strasbourg-Entzheim (bordure ouest du Fossé rhénan)

Sur un puits d'alimentation en eau potable de la station météorologique de l'aéroport de Strasbourg-Entzheim, une altération de la qualité de l'eau (odeur prononcée d'hydrocarbures) a été constatée début 1971 ; en été 1971 une couche de kérosène de 60 cm d'épaisseur recouvrait l'eau dans ce puits. Une estimation de la quantité totale de produit pétrolier déversée et infiltrée dans le sol se chiffrait en 1973 à plusieurs milliers de m³. Dans cette hypothèse, l'extension en plan du corps d'huile approchait les 160.000 m². L'analyse de prélèvements d'eau effectués sur les piézomètres du réseau de surveillance mis en place (concentrations en hydrocarbures de l'ordre du mg/l) a conduit à délimiter une zone contaminée de 400.000 m² environ.

La coupe géologique du site est issue d'un forage expérimental réalisé au droit de la zone d'infiltration (cf. fig. 4.11). La fig. 4.12 présente une vue d'ensemble des conditions géologiques du secteur d'étude autant de l'aéroport sous forme d'une coupe verticale dans l'axe de l'écoulement souterrain.

Des échantillons d'eau prélevés au puits de captage de la commune de Lingolsheim en 1976 titraient jusqu'à 0,65 mg/l d'hydrocarbures dissous, dont l'origine ne put cependant être attribuée avec certitude à ce cas accidentel.

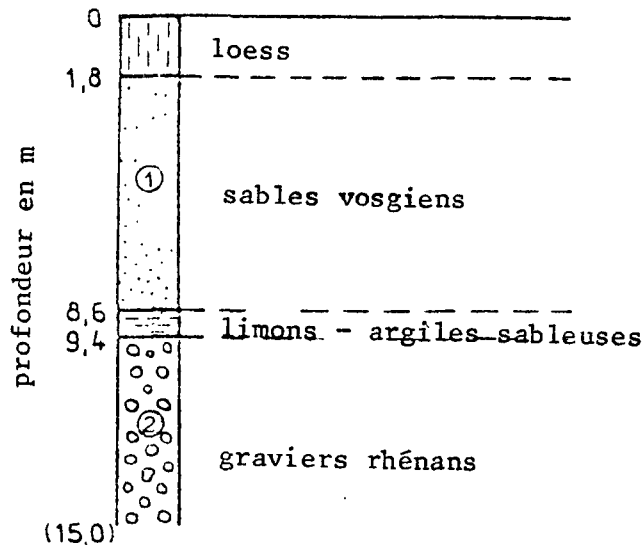


Fig. 4.11 : Cas Strasbourg-Entzheim. Forage expérimental au droit de la zone d'infiltration.

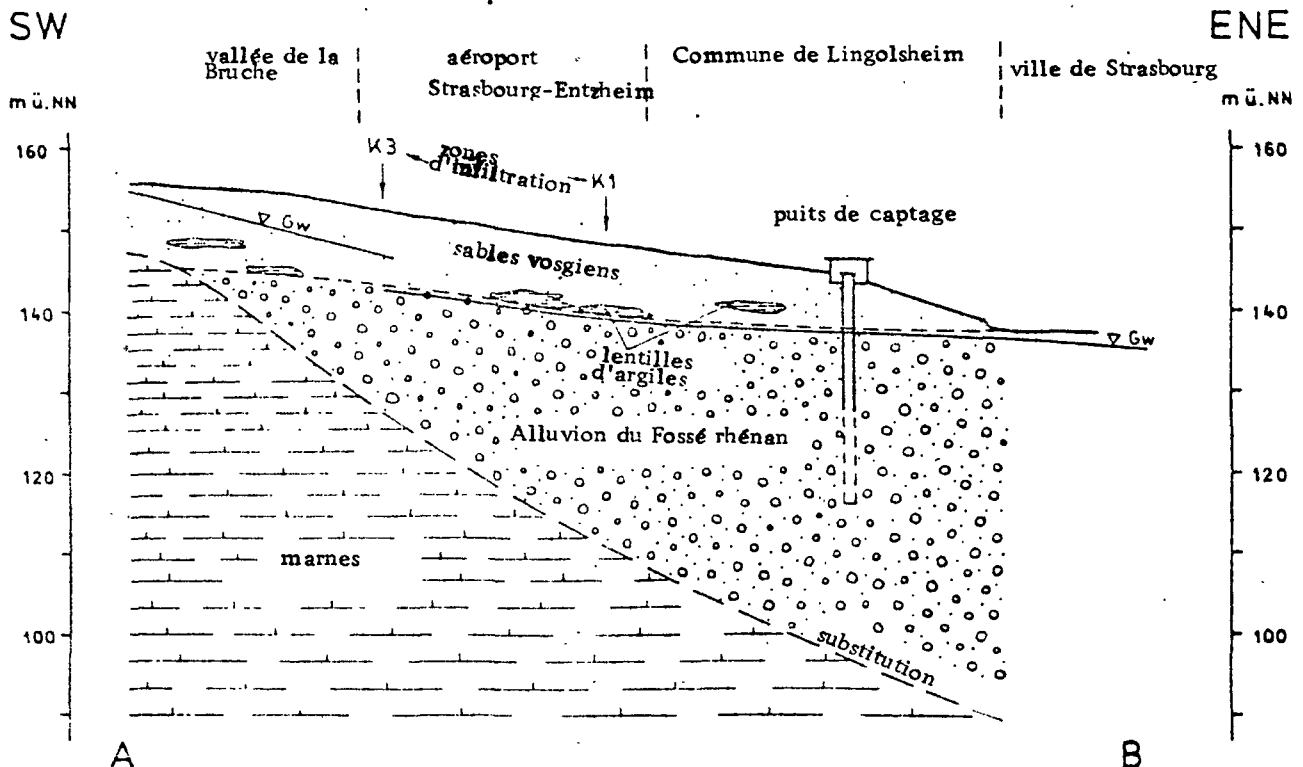


Fig. 4.12 : Cas Strasbourg-Entzheim. Coupe hydrogéologique, schéma avec forte distorsion.

L'eau souterraine circule globalement de sud-ouest vers nord-est (cf. Fig. 413). Le toit de la nappe se situe à environ 9 à 10 m sous le niveau du sol ; ses fluctuations sont en moyenne de $\pm 0,50$ m. L'ordre de grandeur des conductivités hydrauliques k_f est de 10^{-4} m/s pour les sables vosgiennes et de 10^{-3} m/s pour les graviers rhénans sous-jacents.

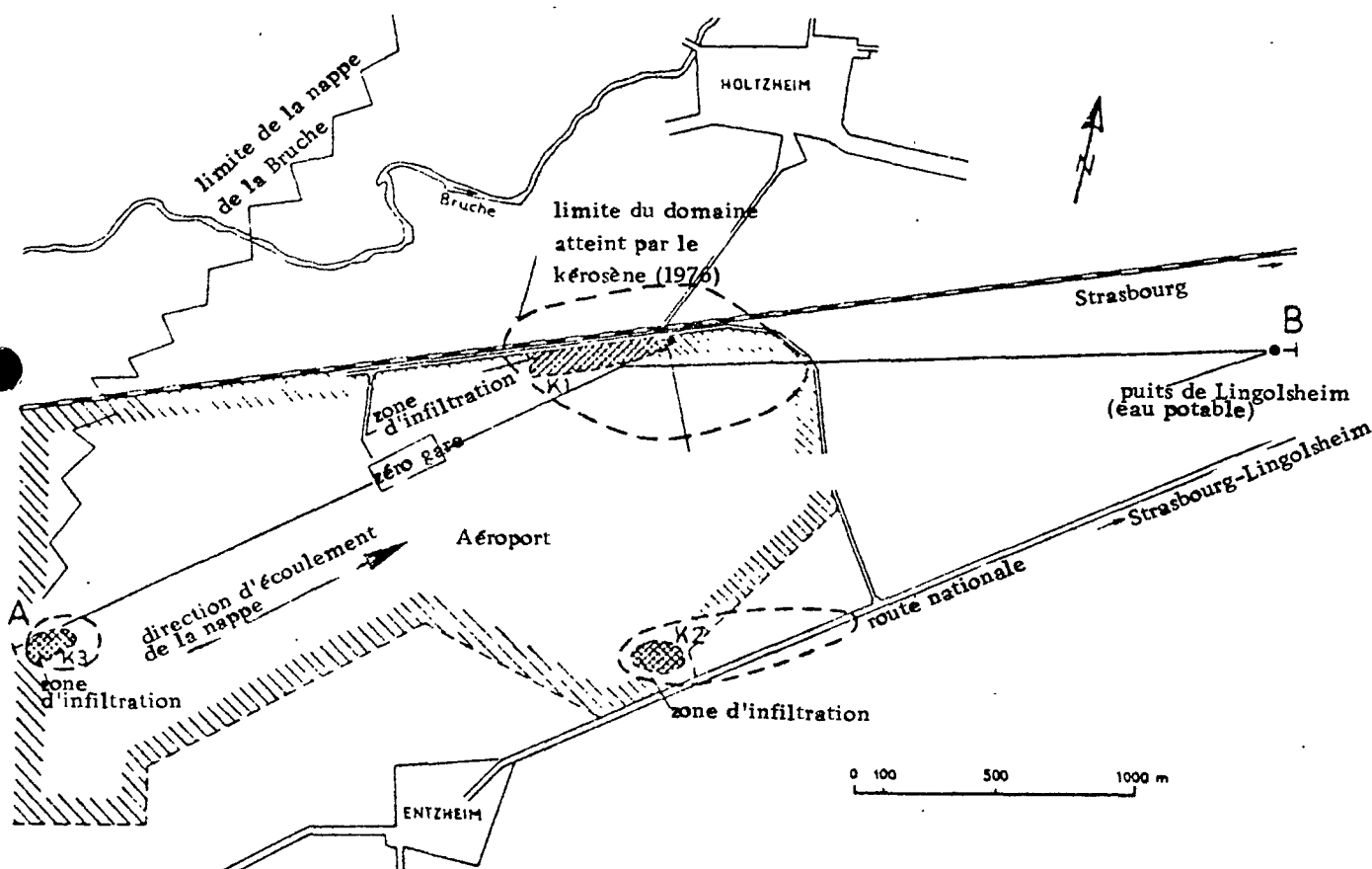


Fig. Cas Strasbourg-Entzheim. Plan de situation.

Les actions de dépollution entreprises sont :

- récupération du kérosène dans un puits de pompage
- biodégradation de la phase huile dans la zone non saturée par plantation de luzerne.

Les résultats ne correspondaient pas aux effets attendus. La récupération par effet hydrodynamique (accumulation par rabattement de la nappe) s'est soldée sur deux ans (1975-1976) par seulement 80 m³ environ d'huile repompée. La croissance des racines de luzerne qui peuvent dans certains cas atteindre en 18 mois jusqu'à 9 à 10 m de profondeur, fut freinée par suite de la forte teneur en eau de la couche de loess. L'idée d'accélérer la biodégradation des hydrocarbures par fixation de l'azate atmosphérique par les bactéries hébergées au niveau du système racinaire, était cependant originale.

La prise en considération d'éléments de dynamique des fluides à conduit à l'hypothèse de travail ci-après mentionnée. A la base des sables vosgiens s'est formée une frange d'eau capillaire suspendue au-dessus de laquelle le kérosène infiltré s'est étalé ; l'huile n'a donc pas pu atteindre directement le niveau de la frange capillaire formant le toit de la nappe. La fig. 4.14 représente schématiquement de telles conditions. Les échantillons d'eau récemment prélevés dans les piézomètres du site ne révélaient pas de traces d'hydrocarbures aromatiques en provenance du kérosène. L'existence d'un barrage naturel (eau capillaire suspendue) du transfert d'hydrocarbures solubles dans l'eau souterraine conduit à un surcroît de prudence lors de l'exécution de nouveaux forages sur le site : tout percement de cet "écran protecteur" peut entraîner une arrivée d'huile au toit de la nappe.

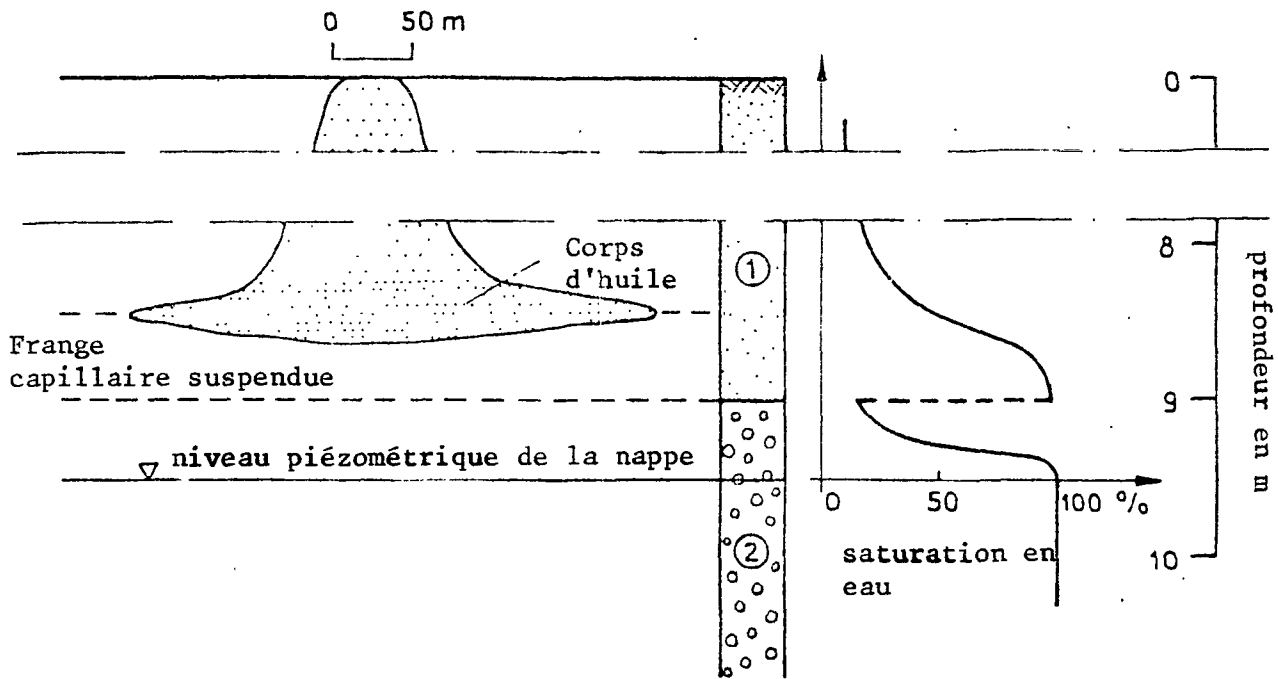


Fig. 4.14 : Cas Strasbourg-Entzheim. Hypothèse de l'étalement d'huile au niveau de la frange capillaire suspendue.

Cas 6 - Haguenau (Bas-Rhin)

A la suite d'un accident à la mi-août 1965, un camion-citerne déversa son contenu de gazole dans le fossé en bordure de la route ; en peu de temps, les 24 m³ de produit pétrolier se sont infiltrés. La zone d'infiltration était de ce fait étroite et allongée (cf. figure 4.15). Des sondages sur le lieu de l'accident mettaient en relief une couche de 3 mètres d'épaisseur de sables fins avec présence d'argiles en surface. Sous cette couche se trouvaient des sables plus grossiers. Dans les piézomètres d'observation P2, P3 et P4, on ne peut déceler, 3 semaines après l'accident, que des traces d'huiles.

Un essai de rabattement de courte durée dans le puits F permit de récupérer 10 litres d'huile à peine. Mis en place plus tard, un puisard de deux mètres de diamètre, crépiné uniquement sur une hauteur de 1 mètre au niveau du toit de la nappe et totalement étanche par ailleurs, ne produisit que 0,5 m³ d'huile, le rabattement était insuffisant.

Plus de 2 ans et demi après l'accident, l'extension du corps d'huile a été contrôlée à l'aide de 16 forages. La coupe horizontale de la figure 4.16 montre l'extension maximale. Le corps d'huile est notablement élargi par rapport à la forme de la surface d'infiltration et, ce qui est remarquable vu le temps écoulé depuis l'accident, sa déformation dans la direction de l'écoulement reste faible. On a l'impression que cette configuration correspond au stade final de l'extension d'huile. D'après les coupes géologiques parallèles à la route (figure 4.17), on remarque que le gazole a localement pénétré à plus de 5 m de profondeur au droit de la zone d'infiltration. Ceci ne s'explique que par la faible cote du niveau d'eau en fin d'une période de sécheresse au moment même de l'accident. Suite à la remontée ultérieure de la nappe - surtout pendant l'hiver 1965-1966 - d'environ 1,30 à 1,50 m, la partie de l'huile supposée encore mobilisable au niveau du toit de la nappe se trouvait fixée de manière quasi irréversible.

Par calcul, on a déterminé le volume de terrain atteint par le produit pétrolier : 1.600 m³ au total. Devant le maigre résultat des essais de récupération de gazole par pompage, l'excavation du sol imprégné fut décidée. Sur la base de ce volume de terrain et de la quantité de produit restant dans le sol, on aboutit à la valeur moyenne de teneur en huile de l'ordre de 15 l/m³. Ce résultat explique bien le faible rendement des essais de récupération.

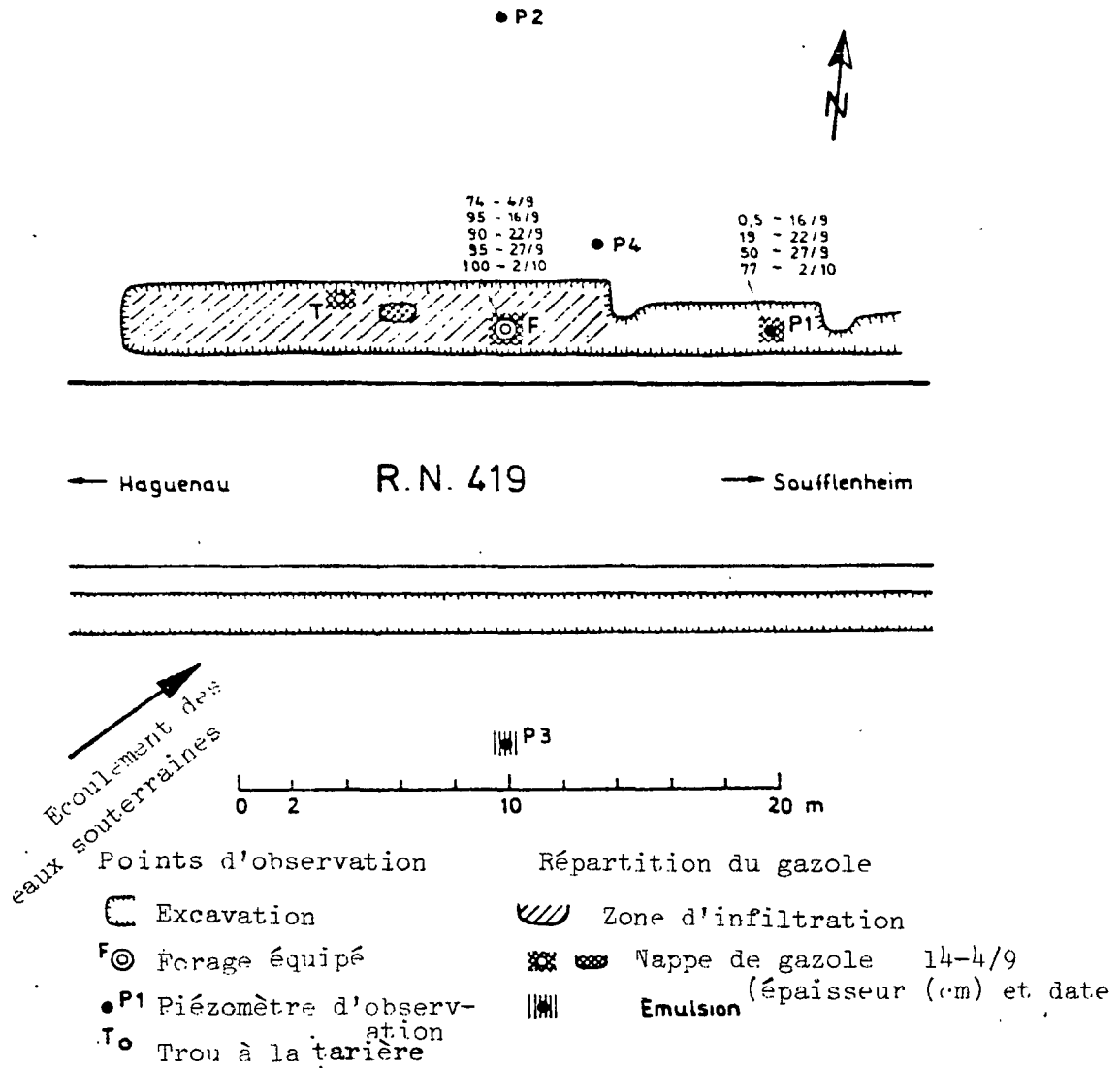


Bild. 4.15: Cas Hagenau. Situation (croquis)

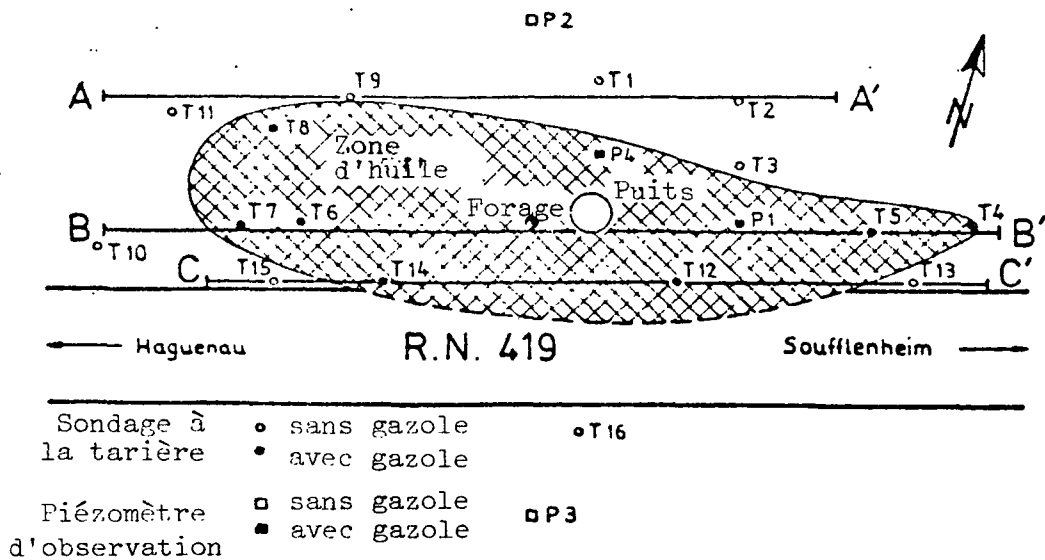


Bild 4.16: Cas Hagenau. Extension de la zone de gazole

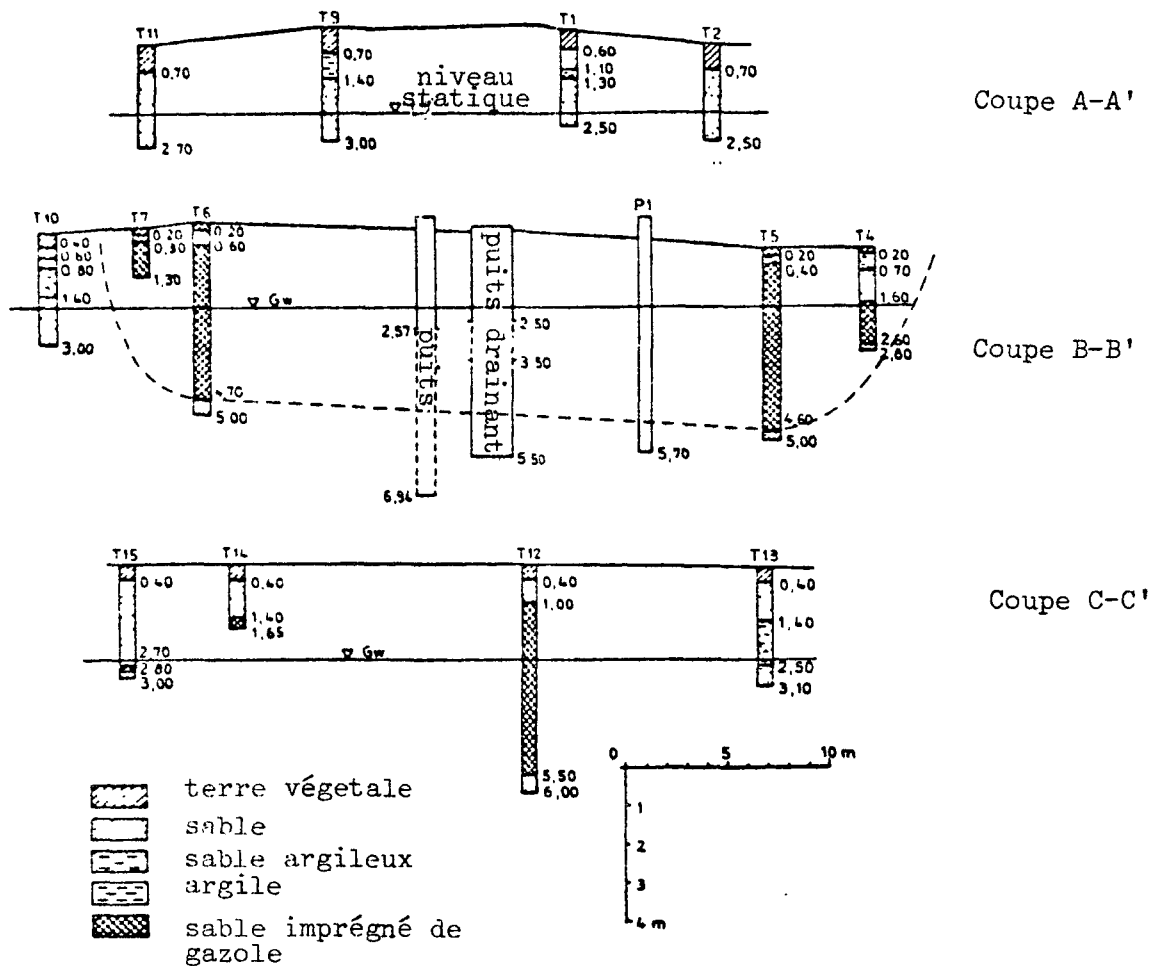


Bild 4.17: Cas Hagenau. Coupes géologiques du corps d'huile

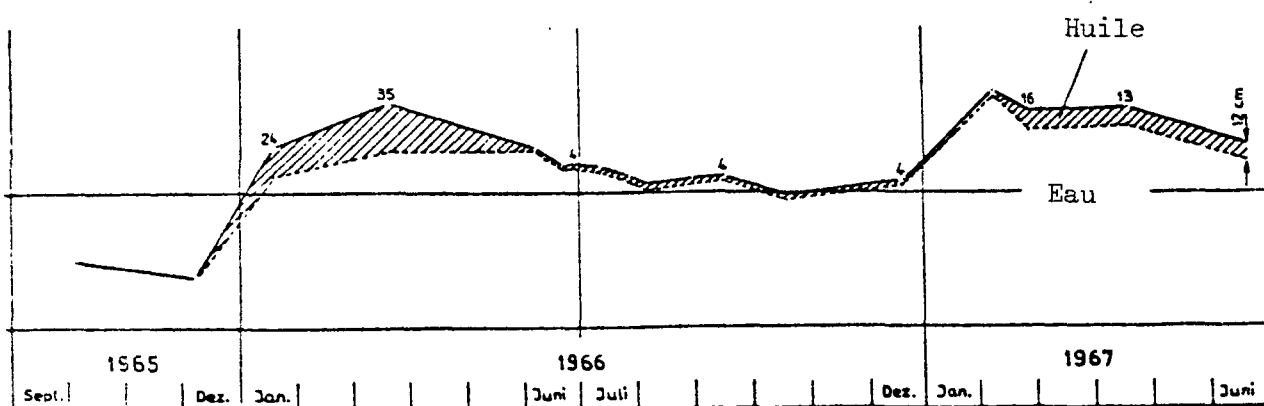


Bild 4.18: Cas Hagenau. Niveau de l'eau et épaisseur de la couche de gazole dans le piézomètre P4

Cas 7 - Hoenheim (près Strasbourg)

Le 27 septembre 1971, 7 m³ de supercarburant, déversés par un camion-citerne accidenté, se sont infiltrés dans le fossé en bordure de la route. Le toit de la nappe se situait environ 3 m sous le niveau du sol ; d'après des mesures plus anciennes à cet endroit, le niveau piézométrique peut encore monter de 1,5 m. 72 heures après l'accident, on procéda à l'excavation des terres imprégnés à la pelle mécanique et on brûla l'essence qui s'était étalée au-dessus du niveau d'eau dans la fosse ainsi creusée. La profondeur maximale de celle-ci était de 3,5 m et sa surface au sol est indiquée sur le croquis de la figure 4.19.

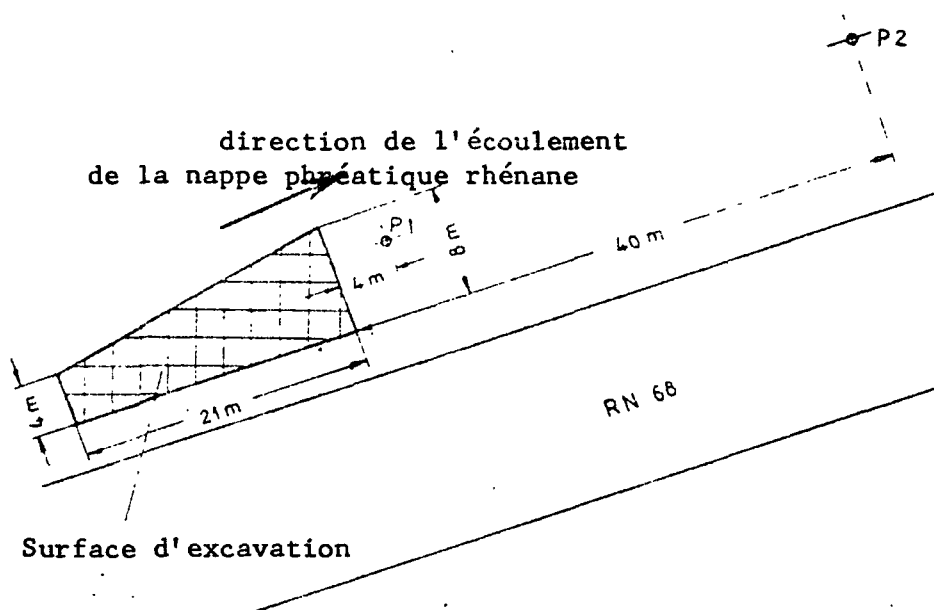


Fig. 4.19 Cas Hoenheim. Schéma de la situation

Quelques jours plus tard, après un abaissement du toit de la nappe, une mince couche d'essence recouvrait la surface de l'eau. Ceci indiquait la présence d'essence dans le sol au voisinage de l'excavation. Pour contrôler l'étendue de la pollution, deux piézomètres d'observation P1 et P2 furent mis en place les 17 et 19 novembre 1971. A partir des forages et de l'analyse d'échantillons de sol, lors de l'excavation on a pu établir la coupe hydro-géologique de la figure 4.20.

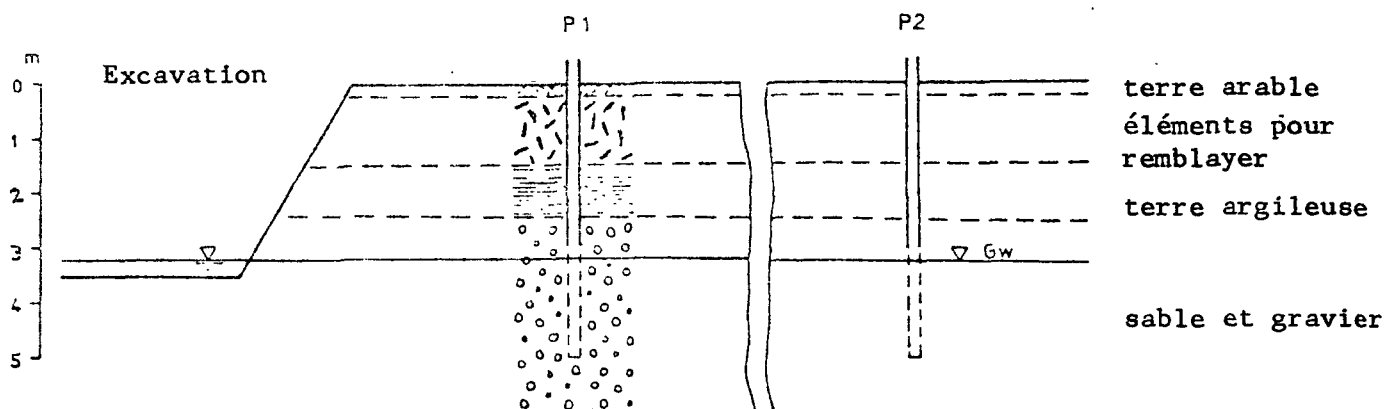


Fig. 4.20 Cas Hoenheim. Coupe hydrogéologique

Les analyses (ir- spectroscopie) indiquaient une teneur en hydrocarbures dissous de 24 mg/l. Elles montraient que l'intervention par excavation et combustion in situ de l'essence n'avait pas totalement évité la pollution, Les quantités d'essence infiltrées sous la chaussée ou en d'autres endroits encore n'étaient pas négligeables. Quelques mois plus tard, on procéda à une nouvelle campagne d'analyses car à 250 m en aval se trouvaient des puits de particuliers (leur eau ne présentait cependant ni odeur ni goût d'hydrocarbures). Les résultats du 3 mars 1972 indiquaient: dans P2 une forte odeur caractéristique et une teneur de 7,2 mg/l d'hydrocarbures dissous, dans le puits d'un particulier une teneur de l'ordre de 0,08 mg/l mais dont l'origine ne pouvait être attribuée à l'accident en question.

8: Mannheim (Fossé rhénan)

le sous-sol.

Topographic map of the Mannheim-Viernheim area. The map shows contour lines with elevations ranging from 88.4 to 94.0. Key locations labeled include LUDWIGS-HAFEN, MANNHEIM, and VIERNHEIM. Roads are marked with numbers: B44, B38, and B33. A legend on the right defines symbols: T (dépôt des réservoirs), K (dépôt de jerricanes station de remplissage), O^W (station de pompage), (série de puits), and a wavy line (limites des constructions). A scale bar at the bottom right indicates 0 to 3 km. A north arrow is in the top left.

Le sous-sol est composé de sables pléistocènes de grain moyen à grossier avec une perméabilité moyenne de $k_f = 7 \cdot 10^{-4}$ m/s. Le niveau de la nappe phréatique, se trouvait au moment de la pollution vers environ 7 m sous la surface du sol. En divergeant du sens normal d'écoulement de la nappe, ce dernier se dirige vers l'Est dans les puits d'une station de pompage éloignée d'environ 1 km. 3-5 km au Sud-Est de la perte se trouve l'aire des prises d'eau Käfertal.

D'abord furent forés 4 puits de protection (I-IV) à l'Est et au Sud-Ouest du lieu de pollution. Les vapeurs d'essence échappées du sous-sol créèrent un danger d'explosion et rendirent les travaux de sondage difficiles. En 1963 on constata qu'à l'Est des pertes d'essence, une quantité inconnue de fuel s'était échappée d'une conduite non étanche et répandue sur la nappe phréatique (fig. 4.22). Les 4 puits créés pour combattre les pertes d'essence ne permettaient pas de lutter contre cette pollution de la nappe. Ces puits, en fonction depuis plusieurs années, montraient en effet des phénomènes de corrosion et de dépôt; en 1965, on créa dans la zone Est de la flaque d'huile le puits de protection V. Cela était d'autant plus nécessaire que d'autres petites pertes avaient été découvertes. Le 5e puits de protection resta en fonction jusqu'en 1971 (fig. 4.23) avec un rendement atteignant par moments 70 m³/h. Le niveau de la nappe fut ainsi abaissé de près de 2.5m. L'eau épuisée fut déversée 350 m plus au N dans un bassin filtrant. Pour favoriser l'évaporation des hydrocarbures dissous on ventila le bassin.

Les mesures de protection ont abouti à ce que finalement tous les points d'observation ne montraient plus d'huile. Vers la fin on n'épuisa plus que 50 l par semaine dans le puits de protection. Les travaux de protection furent arrêtés au printemps 1971 dans le dépôt de réservoirs. Jusque-là on avait pompé environ 1,5.10⁶ d'eau souterraine. A ce moment on peut établir le bilan suivant :

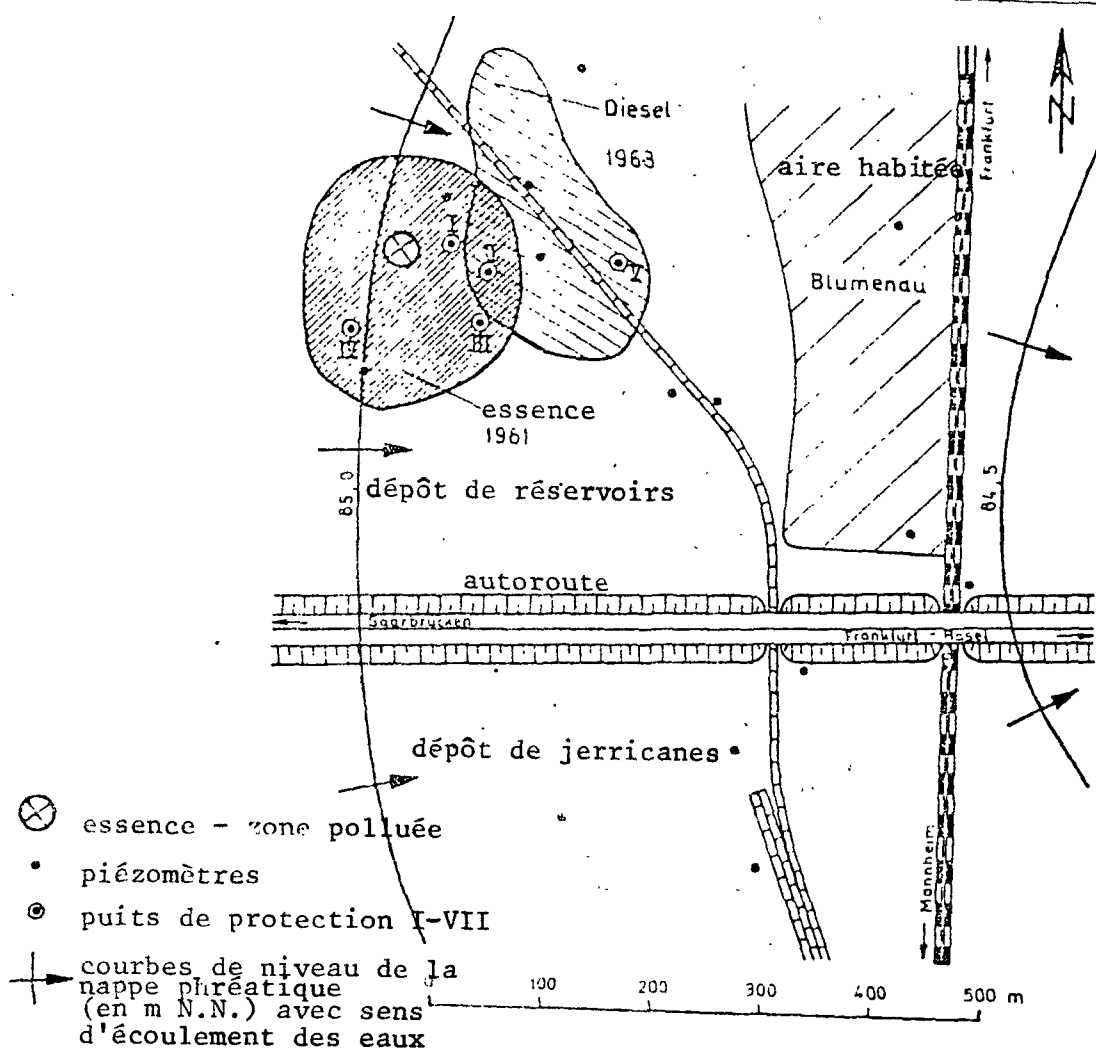


Fig. 4.22 : Cas Mannheim. Extension de l'huile en 1961 resp. 1963

Volumes perdus

avant 1960	~75 m ³	essence
mai 1961	1000	essence
1961-1965	125	diesel
total	~ 1200	huile minérale

Récupération

pompé dans le bac en mai 1960	250	essence
récupéré dans les puits de protection 1961-1971	715	essence et diesel
hydrocarbures dissous dans l'eau	~ 5	huile minérale
retenu dans l'aire d'infiltration	~ 10	huile minérale
Total	~ 980	huile minérale
dans la nappe phréatique sont donc restés et y furent dégradés ou se sont évaporés	~ 220	huile minérale
Total	~ 1200	huile minérale

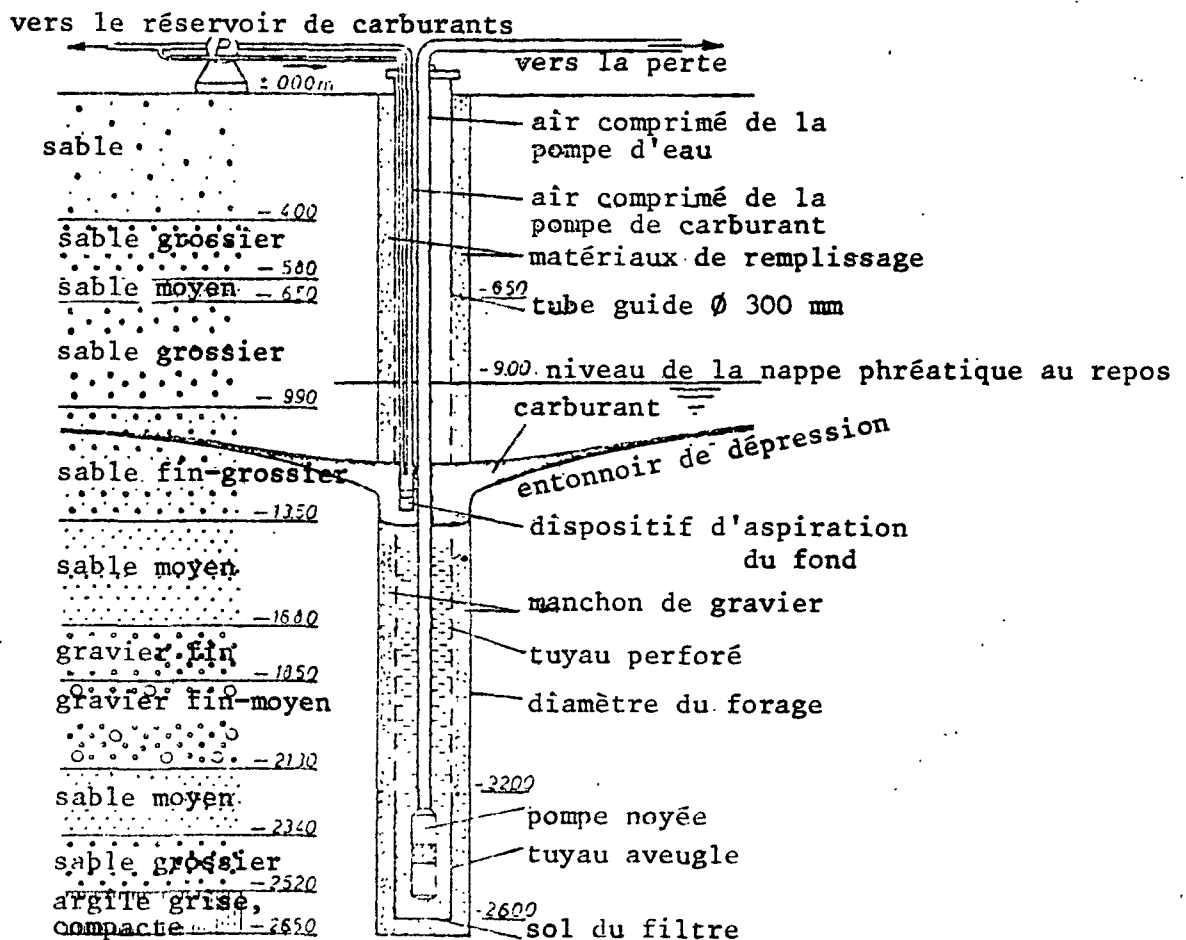


Fig. 4.23 : Cas Mannheim. Puits de protection V.

La portion ainsi récupérée s'élève donc à 76 %. La figure 4.24 illustre la récupération dans le temps.

La surveillance ultérieure des piézomètres permet de découvrir en mai 1972 aux abords du dépôt de jerricanes dans le puits 24, une couche d'huile de 40 cm sur la nappe. C'était un mélange de diesel et d'essence. Au cours de 2 années suivantes on récupéra dans ce piézomètre de diamètre 125 mm 10 m³ d'huile.

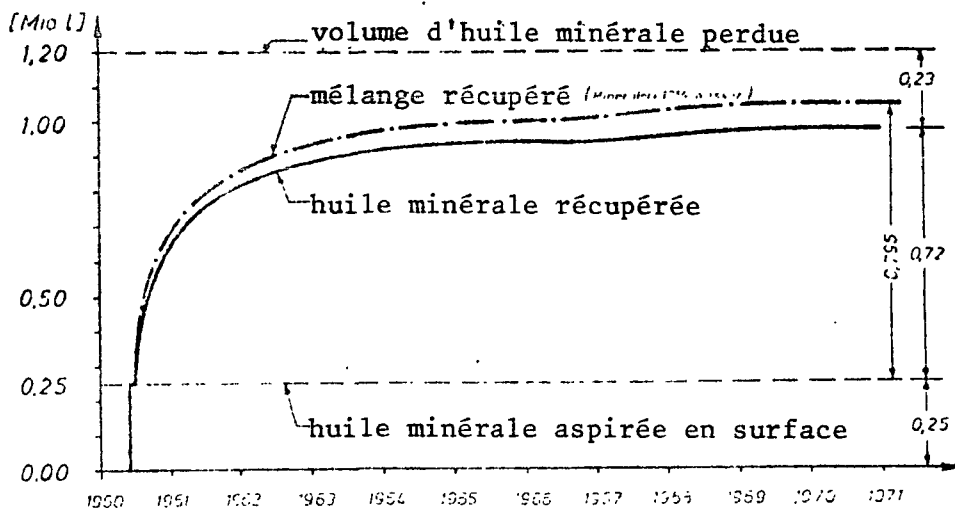


Fig. 4.24 : Cas Mannheim. Evolution dans le temps de la récupération d'huile.

Le 28 avril 1974 un tuyau perforé de la canalisation du dépôt de jerricanes cassa (croix de la fig. 4.25). Une quantité inconnue de diesel s'écoula dans le sous-sol. Sans délai on forà à quelques mètres à l'Ouest de la perte le puits de protection VI de 300 mm de diamètre et en plus, dans un rayon de 50 m 4 piézomètres. Malgré un débit de 10 l/s et un abaissement de la nappe de 2,5 m dans le puits de protection septentrional VI du dépôt de jerricanes on devait mesurer une couche d'huile épaisse de 2,45 m sur la nappe phréatique. Conformément au programme des mesures de protection le dépôt de réservoirs fut à nouveau contrôlé en 1974 ; on constata qu'une phase d'huile s'y était à nouveau ramassée. La Fig. 4.25 montre l'état de la pollution durant l'été 1974. Elle montre l'extension de la zone de la nappe contenant des particules d'huile dissoutes.

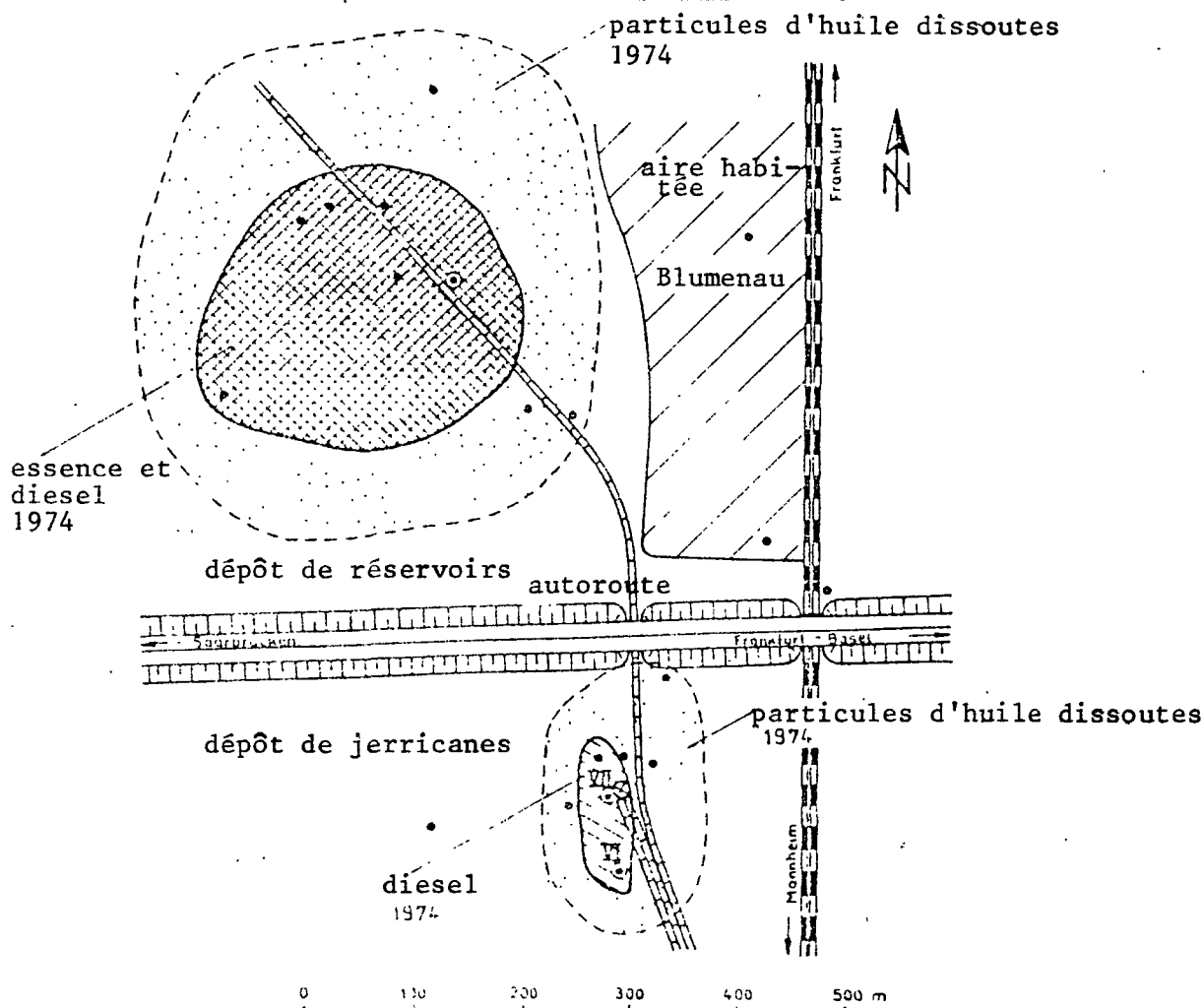


Fig. 4.25 : Cas Mannheim. Etat de la pollution de la nappe en 1974.

Le pompage dans les 3 puits de protection V, VI et 24 a été poursuivi régulièrement jusqu'en 1979. Un résultat important n'a été constaté que dans le dépôt de réservoirs où on ne trouva plus de phase d'huile minérale en juin 1979. Les puits de protection VI et 24 présentaient encore toujours des couches d'huile épaisses de quelques mm. A ce moment, l'eau que l'on y puisait était réduite. Les teneurs en Fe^{2+} étaient de 3,7 mg dans le Puits VI, de 4,0 mg dans le puits 24. Il apparaît qu'une importante biodégradation des restes d'huile minérale a lieu dans la zone centrale de la nappe phréatique anciennement polluée du dépôt des réservoirs. Comme suite de la réduction sulfureuse, on y trouve des teneurs élevées en hydrogène sulfuré (puits V : 1,7 mg/l H_2S , piézomètre 5 : 2,4 mg/l H_2S).

Cas 9 : Heidelberg-Wieblingen (Fossé rhénan)

A la suite d'une erreur de manoeuvre de la manette d'alimentation du réservoir d'un bâtiment scolaire, environ 40 m³ de fuel se sont écoulés. Dans la zone sinistrée la nappe phréatique se trouve à 15 m de profondeur dans les sables et graviers quaternaires du fossé rhénan. Les mesures de protection prises sans délai (sortie du réservoir et de la terre polluée) ont permis de récupérer à peu près la moitié du fuel écoulé.

Dans la direction du sens d'écoulement de la nappe, à environ 2,5 km, se trouve la station de pompage de la ville de Heidelberg (fig. 4.26). Les courbes de niveau de la nappe montrent de façon indubitable les arrivées d'eaux du Neckar dans le corps aquifère. Dans le souci de protéger l'eau potable de la ville, on fora d'abord les puits 1 et 2 à proximité de la pollution, plus tard, vers l'aval du sens d'écoulement de la nappe, les puits 3-6 aux diamètres de 300 et 600 mm, ainsi que le piézomètre 7 avec tuyau perforé de 150 mm (fig. 4.27).

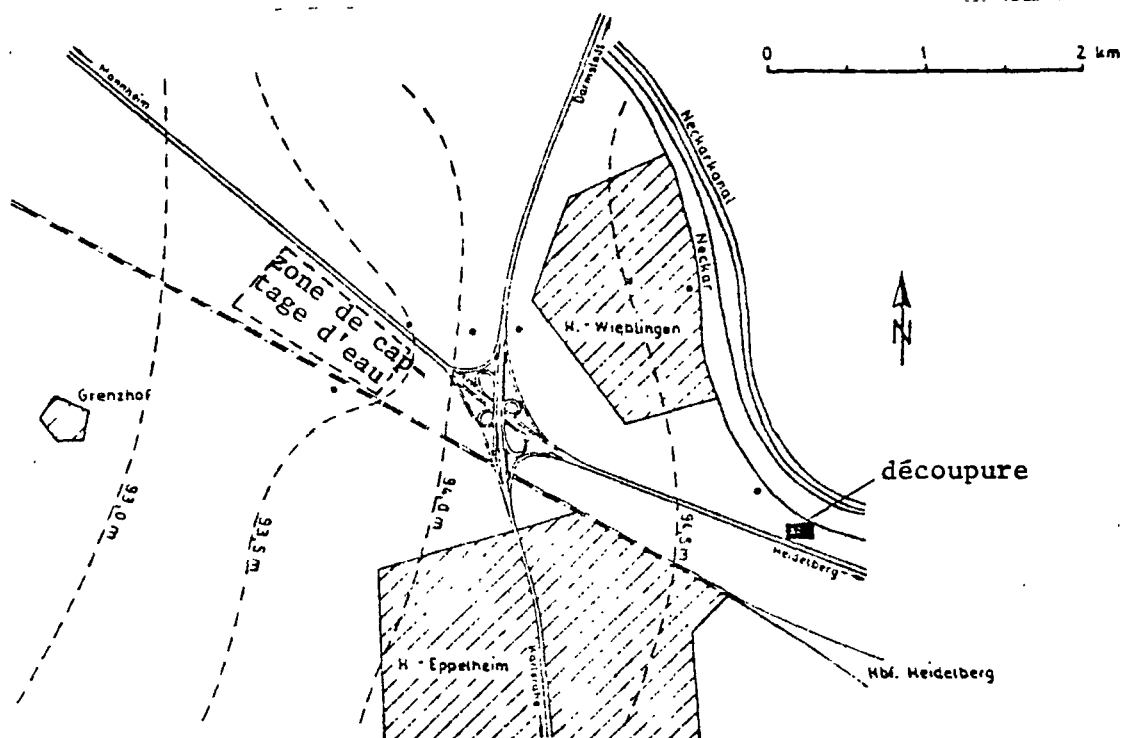


Fig. 4.26 : Cas Heidelberg-Wieblingen. Plan d'ensemble.

Les puits 1 et 2 ont été écopés de juin 1973 à juillet 1974. On récupéra ainsi, surtout au séparateur d'huile du puits 1 environ 1,2 m³ d'huile. Durant ce temps, environ 1,2 m³ d'huile ont été aspirés à la surface de l'eau des puits 1 et 2. Par intervalles, les puits 3-5 et le puits 6 de plus grande dimension (ce dernier avec 320 m³/h) étaient en fonction. Mais ces puits n'ont jamais fourni de l'huile liquide. Mais on y trouva parfois des parties dissoutes en quantités importantes. Au cours des 14 mois de protection, on a enlevé près de 1,5 Mil. m³ d'eau (1,1 Mil. m³ du puits 6 seul) de la nappe. Après arrêt des pompages, et jusqu'à nouvel-an 1974-1975, des couches d'huile, atteignant parfois 6 mm surtout dans le puits 1, apparaissaient encore dans les puits 1 et 2. On aspira régulièrement ces couches libres. Puis ces épaisseurs se réduisaient à des films et des flaques d'épaisseur non mesurables.

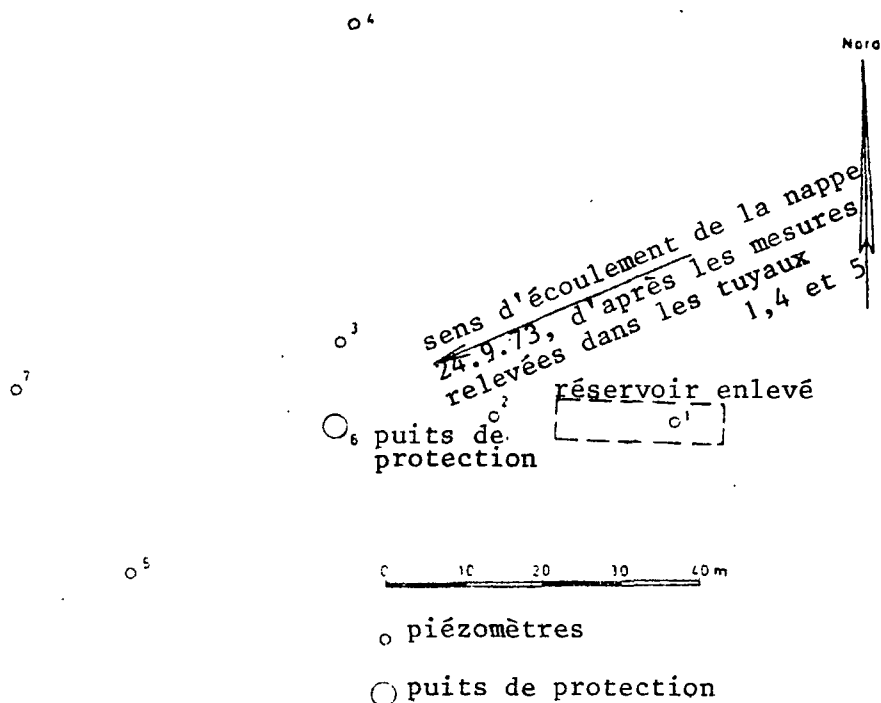


Fig. 4.27 : Cas Heidelberg-Wieblingen. Plan de situation.

Dès juillet 1974, l'apparition d'un mélange algues-huile au contact de la nappe phréatique et de l'huile, permettait de déceler une activité biologique. De plus la dégradation avait réduit la teneur moyenne en nitrates de l'eau souterraine de 20 mg/l à 0,05 mg/l dès septembre 1974 (puits 2). En janvier 1976 on colmata tous les puits sauf le n° 2. De diamètre de 150 mm, on le maintint à titre de puits de contrôle. A partir de mi-1976, il n'y avait plus de phase huile, mais des champignons blancs y apparurent. En décembre 1978, l'eau souterraine montrait pourtant encore des propriétés réductrices nettes, avec des teneurs en hydrogène sulfuré atteignant 0,3 mg/l. Les produits biodégradés apparaissent dans un spectre infrarouge anormal (fig. 4.28).

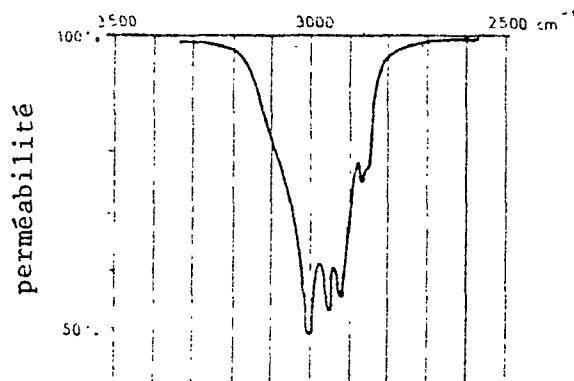


Fig. 4.28 : Cas Heidelberg-Wieblingen. Spectrogramme infrarouge.

Une élévation de la température de 2,5°C par rapport à celle des puits environnants montre que l'activité bactérienne s'est encore poursuivie en avril 1979.

Cette pollution entraîna des dépenses s'élevant à 1,25 Mio DM.

Cas 10 : Essai sur champ Graben-Neudorf (fossé rhénan)

Pour étudier le comportement du fuel EL dans des roches perméables et son action sur la composition des eaux souterraines, on a entrepris en 1967 et 1968 des expériences dirigées dans la partie septentrionale de l'arrondissement de Karlsruhe. Le champ d'essai était le plancher d'une ancienne balastière, situé à près d'un mètre au-dessus du niveau moyen de la nappe phréatique. L'huile fut déversée dans deux fosses de 4x1 m, perpendiculaires à la direction d'écoulement de la nappe. Dans la fosse méridionale, le niveau de la nappe fut dégagé, la septentrionale fut creusée jusqu'à 30 cm au-dessus de la nappe. On y déversa 3,0 resp. 3,6 m³ d'huile.

Le sous-sol est formé de graviers et sables pléistocènes à surface irrégulière. Le sable humifère couvrant la nappe a été rapporté, la limite est donc irrégulière. Dans la partie N du champ la limite est plus basse que dans la partie S. Un essai de coloration permit d'établir une vitesse moyenne d'écoulement de la nappe de 1,1m/d. La pente de la nappe est de 2 ‰, la conductivité hydraulique de l'eau souterraine $k_f 1,7 \cdot 10^{-3}$ m/s. Durant les observations poursuivies en continuité pendant 2 1/2 ans, le niveau d'eau de la nappe a oscillé dans les limites de 0,7 m.

Des fossés et des sondages ont permis de suivre l'extension de l'huile dans la partie méridionale du champ. Il en résulte que l'extension définitive de l'huile était atteinte après 4 mois. Le centre de gravité de la zone imprégnée se déplaçait dans le sens de l'écoulement de la nappe. Dans le centre du déversement, l'huile est descendue jusqu'à 1,7 m sous le point bas du niveau de la nappe. Dans la partie N du champ les contours de la zone imprégnée étaient plus irréguliers que dans la partie S. La fig. 4.29 représente le stade de l'extension maxima de l'huile.

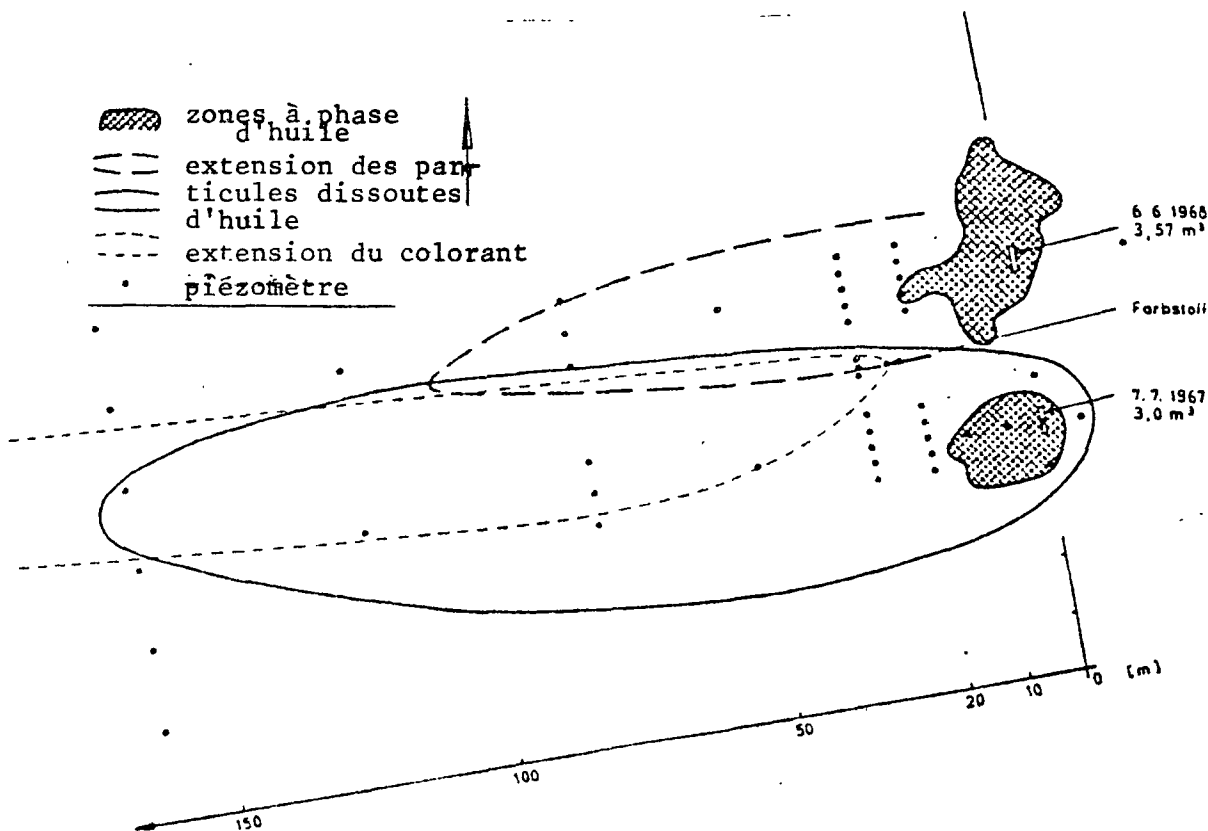


Fig. 4.29 : Champ d'essai Graben Neudorf. Esquisse de la distribution de l'huile

Des échantillons non dérangés prélevés par sondage dans le centre des lentilles d'huile contenaient jusqu'à 100 g fuel/dm³ de terre. En moyenne la teneur en huile de la masse imprégnée n'atteint que 20 g/dm³ environ. En considérant la surface totale de l'extension, il y a environ 8 kg par m². ($D_{\text{huile}} = 10 \text{ l/m}^2 \text{ resp. } 10 \text{ mm}$).

Les piézomètres de la zone imprégnée d'huile de la partie méridionale du champ d'essai ont permis d'observer les relations entre la phase mobile d'huile et la position de la nappe. A l'étiage les épaisseurs d'huile étaient plus fortes ; aux hautes eaux, elles se réduisaient et disparaissaient parfois. On peut illustrer le comportement de la phase mobile d'huile par l'exemple du tuyau implanté 6 m à l'aval du pont de déversement (fig. 4.30).

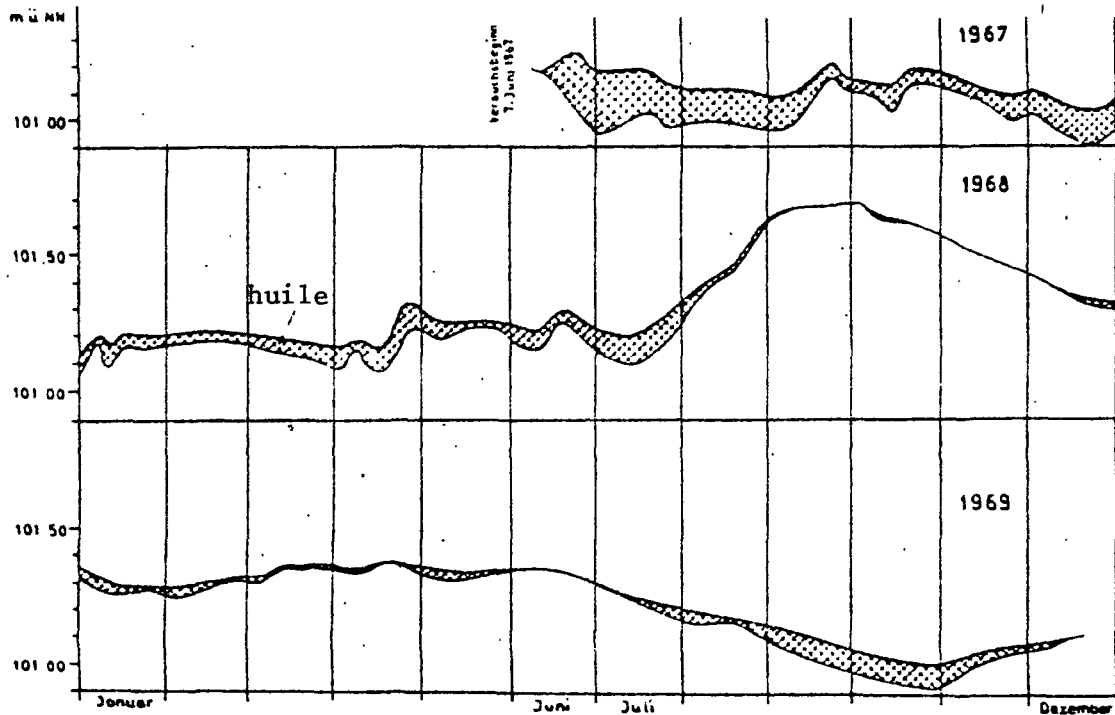


Fig. 4.30 : Champ d'essai Graben-Neudorf. Evolution de l'épaisseur de la couche d'huile dans un piézomètre

De l'huile y apparut pour la première fois 4 jours après le déversement. Fin juin 1967 on y observa la couche la plus épaisse, 230 mm. La zone s'étendant, l'épaisseur de l'huile diminuait. Après 4 mois d'essais, vers la fin septembre 1967, alors que l'extension de l'huile avait à peu près cessé, les épaisseurs d'huile ne dépendaient plus que de la position de la nappe. Ces faits ont pu être très bien observés vers la fin de 1968 : tandis que vers la mi-juillet, le niveau de la nappe se situant vers 101,11 m NN, la couche d'huile surnageant était encore de 90 mm ; début octobre, le niveau de la nappe se situant vers 101,70 m NN, la couche d'huile n'était plus que de l'ordre du mm. Fin 1969, les conditions étaient inverses : le niveau très bas de fin octobre voisin de 100,94 m NN faisait réapparaître une couche d'huile de 92 mm.

Les produits du fuel passés dans l'eau se firent surtout remarquer par leur influence organoleptique. Dans ces essais on attribua l'importance essentielle sur le goût de l'eau. L'extension maxima était atteinte dans les deux champs environ 4 mois après le déversement du fuel. Dans le champ septentrional l'extension maximale des effets organoleptiques était d'environ 100 m, dans le champ méridional de près de 170 m dans le sens d'écoulement de la nappe. L'extension des effets organoleptiques du champ méridional est représentée sur la fig. 4.31 ; celui de son évolution dans le temps sur la fig. 4.32.

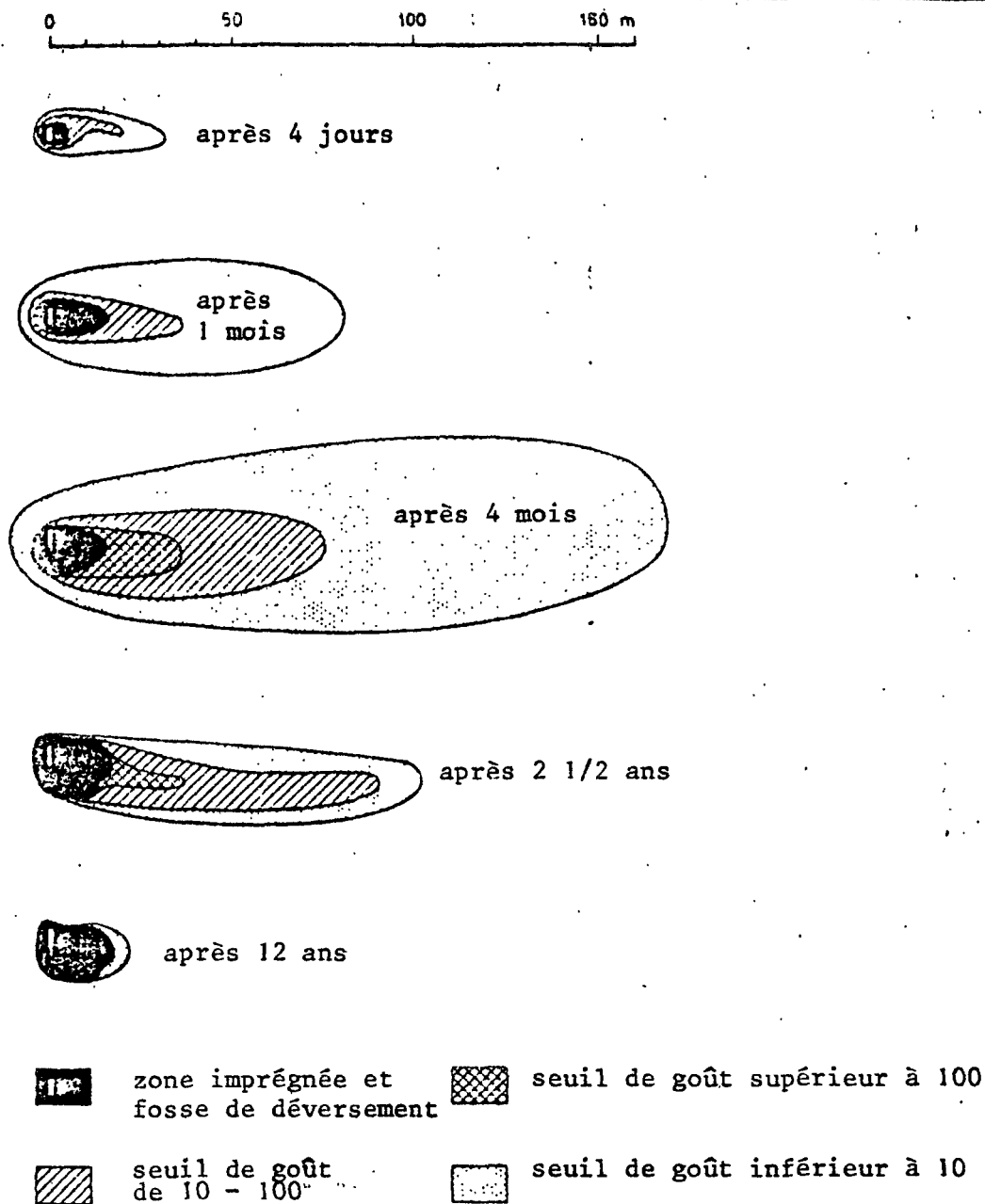


Fig. 4.31 : Champ d'essai Graben-Neudorf, Influence sur l'eau de la nappe dans la zone d'essai, après 12 ans (surveillance, ce)

Après une période d'essai de 12 ans, l'influence organoleptique sur l'eau 20 m à l'aval de la zone imprégnée d'huile, était descendue à la limite de perceptibilité - valeur du seuil inférieur à 2 -. Après une période d'essai de 2 ans, le goût de l'eau a changé dans la partie méridionale du champ de "fuel typique" en "résineux". Dans la partie septentrionale du champ, cette variation s'était fait sentir déjà bien plus tôt.

Une diminution de la teneur en oxygène de l'eau souterraine à l'aval de la zone de déversement a bien été constatée ; mais elle n'était pas aussi forte qu'on l'a souvent observée dans des cas de pollution plus grande (apparition de Fer - II - et de Manganèse - II - ions).

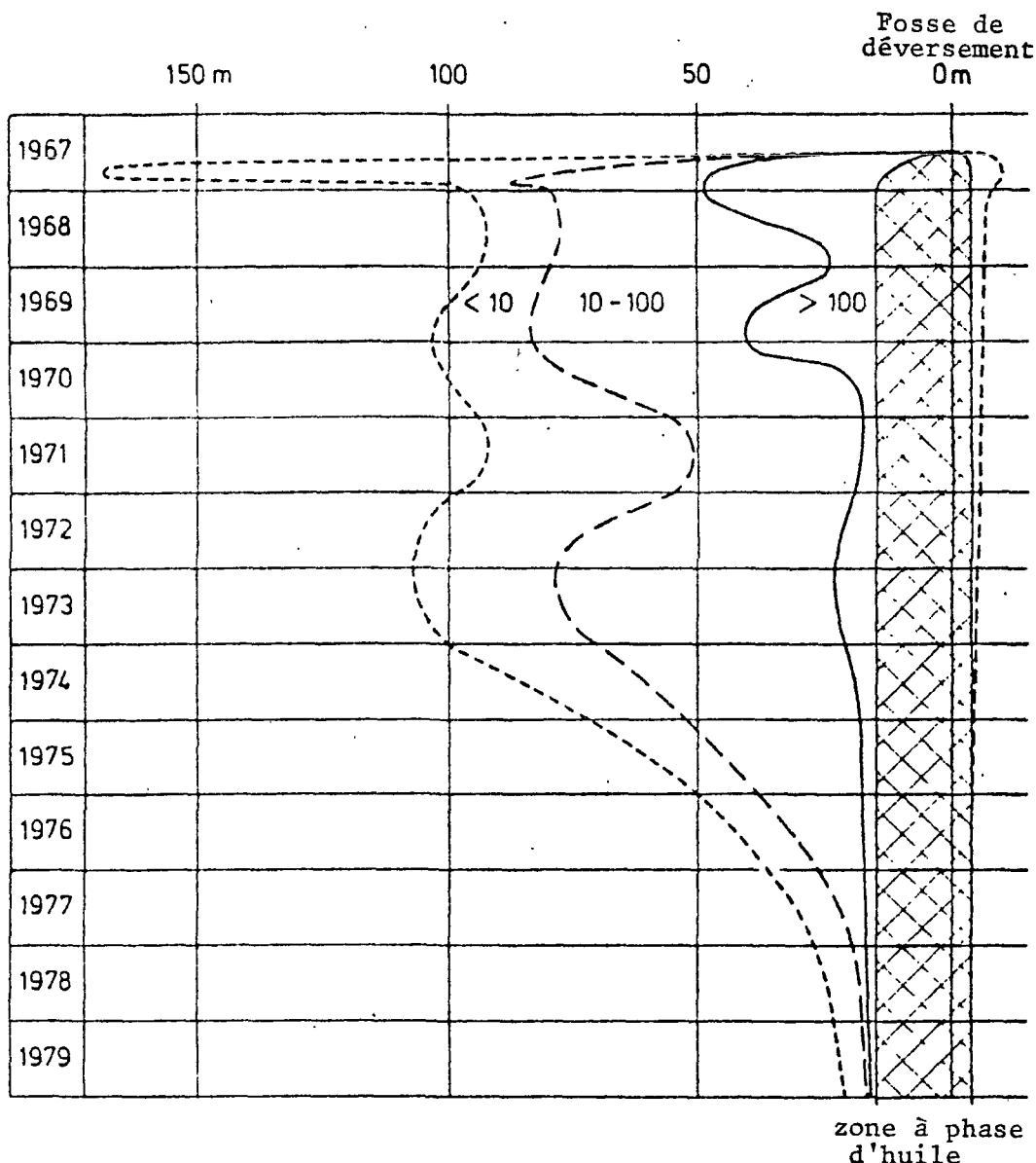


Fig. 4.32 : Champ d'essai Graben-Neudorf. Evolution dans le temps des seuils du goût dans l'axe longitudinal

Cas 11 : Huttenheim (Fossé rhénan)

Dans ce cas, plusieurs dizaines de m³ d'essence ont dû s'infiltrer dans le sous-sol formé de dépôts fluviatiles du Rhin. La date de la pollution est inconnue. La distance du terrain est de 7 m. La zone imprégnée d'huile est d'au moins 150 m. La fig. 4.33 montre l'état de la pollution de la nappe au printemps 1971.

Deux ans après la découverte des dégâts, on n'avait encore observée aucune diminution des zones influencées. Dans l'eau du puits d'incendie F, la chromatographie gazeuse n'a décelé que des hydrocarbures de la série aromatique. Dans les piézomètres 1 et 4 apparaissent en outre d'autres substances, à goût de pommes, résultant de décompositions bactériennes. Au point de contrôle des eaux 3247, la présence de particules d'essence ne peut être décelée qu'après une forte concentration de l'extrait. Après 2 ans les qualités de l'eau de la nappe s'étaient légèrement améliorées. L'intensité des influences de l'huile avait régressé.

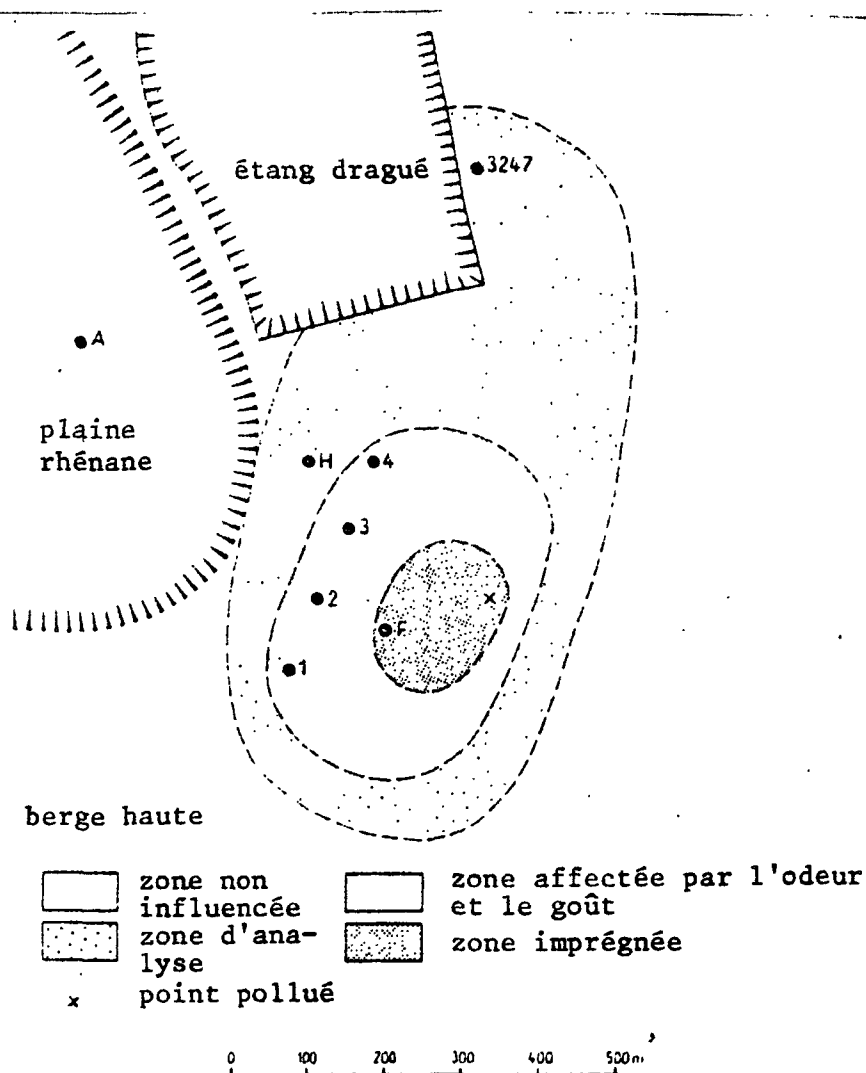


Fig. 4.33 : Cas Huttenheim. Zones de la nappe infestée.

Cas 12 : Hockenheim (fossé rhénan)

Le 12.7.1968, lors du remplissage des réservoirs d'un dépôt, 15,4 m³ de Super sont écoulés et ont pénétré dans le sous-sol qui y est formé de dépôts rhénans pléistocènes récents. Grâce au forage d'un puits de protection et de 3 piézomètres, il a été très vite possible d'avoir une idée assez précise de la position de la nappe phréatique (5 m de profondeur, pente : 1,1 %) et de l'extension de l'huile. L'enlèvement de la terre imprégnée et le pompage durant environ 100 jours ont permis de récupérer à peu près 5 m³ de Super.

La fig. 4.34 montre comment on doit se représenter les diverses zones polluées de la nappe. Le maximum de la pollution était atteint déjà après environ 1 mois ; après 20 mois la pollution avait nettement regressé. Un mois après la pollution, le seuil olfactif se situait vers 15 dans le piézomètre ; après 20 mois on n'y relevait plus aucun goût d'essence, bien que la chromatographie gazeuse démontrait nettement des traces de benzène, de toluène et de xylène. La régression relativement rapide des zones polluées est en 1^{re} ligne à interpréter comme une suite de l'évaporation de la phase huile.

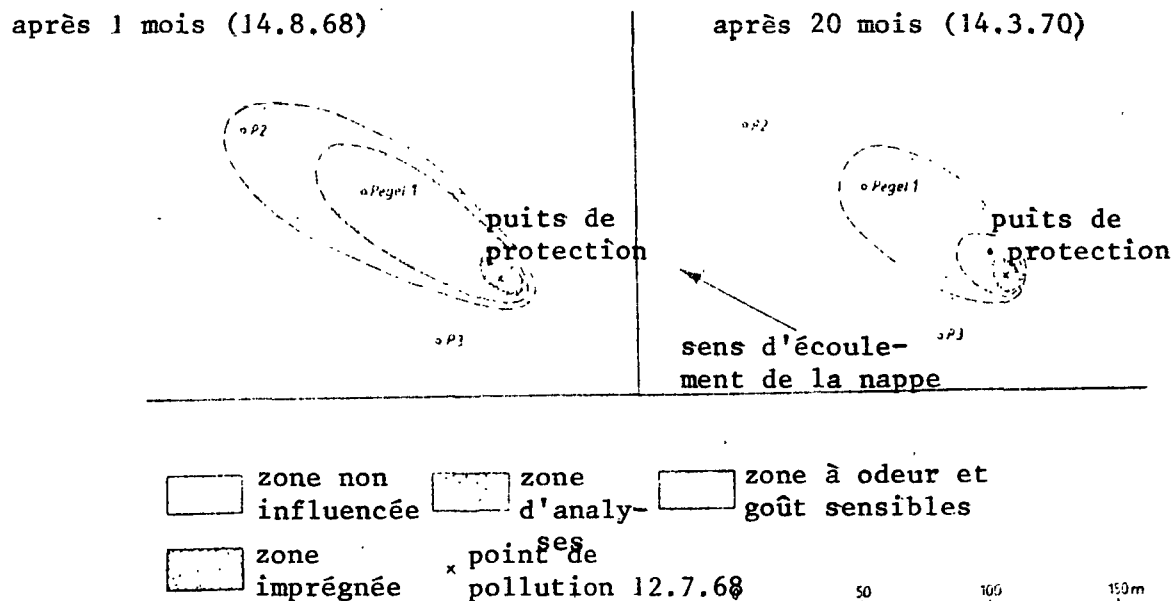


Fig. 4.34 : Cas Hockenheim. Zones polluées de la nappe.

Cas 13 : Frankenthal (Fossé rhénan)

A l'occasion de l'étude et de l'assainissement d'une pollution par fuel à l'intérieur d'une ancienne usine à gaz, on a constaté en 1974 du benzène à la surface de la nappe phréatique. Ce benzène devait remonter à au moins 7 ans, époque à laquelle le benzène était un sous-produit de la production de gaz.

L'usine à gaz est située sur des dépôts fluviatils surtout sableux, pléistocènes récents, passant 400 m plus à l'est des dépôts de sables et de graviers de la basse terrasse rhénane ; le passage est marqué par une nette dénivellation du terrain. La nappe s'écoule environ de l'Ouest vers l'Est. Le niveau de la nappe de l'étage supérieur est à environ 7-8 m de profondeur. L'eau de cet étage (dépôts fluviatils) est utilisée surtout pour le jardinage des habitants, non comme eau potable. Pour l'alimentation en eau potable de la région de Frankenthal, on prélève l'eau au moyen de puits profonds de 100 - 240 m dans les dépôts rhénans pléistocènes anciens, séparés de l'étage supérieur (basse terrasse) par des intercalations imperméables ou peu perméables. Le prélèvement d'eau en profondeur ne se répercute pas sur le niveau de l'eau de l'étage supérieur. Le prélèvement des puits des jardins y entraîne un net abaissement local se répercutant sur l'écoulement de l'eau souterraine du terrain de l'usine.

Les importants travaux de recherche ont permis de reconnaître une mince zone infestée d'huile, s'étendant vers l'Est, se prolongeant par une zone à particules dissoutes de benzène (fig. 4.35). Pour délimiter les zones on a d'abord procédé à une analyse de l'air des pores au moyen d'appareils sensibles aux gaz. En ne tenant pas compte des résultats faiblement positifs des particules dissoutes de la zone septentrionale, on constate que le domaine de la zone à phase gazeuse concorde assez bien avec celui de la zone dissoute. La zone d'extension de la phase gazeuse, donne l'extension maximale, sans tenir compte des mesures de niveau. A proximité immédiate de la surface de la nappe, l'extension du domaine ayant des résultats positifs des analyses d'air, est sensiblement plus petite.

Le changement en direction Nord de la zone à particules dissoutes est sans doute lié aux variations annuelles du sens d'écoulement comme suite des variations des prélèvements. Mais il est clair que les prélèvements d'eau dans les jardins au cours de la période végétale, déterminent la direction générale de l'extension des produits dissouts (fig. 4.36). La répartition des concentrations des particules dissoutes d'huile confirme le sens principal d'écoulement (fig. 4.37). Les puits de jardin, situés à l'intérieur de la zone polluée, ont tous montré un goût ou une odeur plus ou moins marquée de benzène.

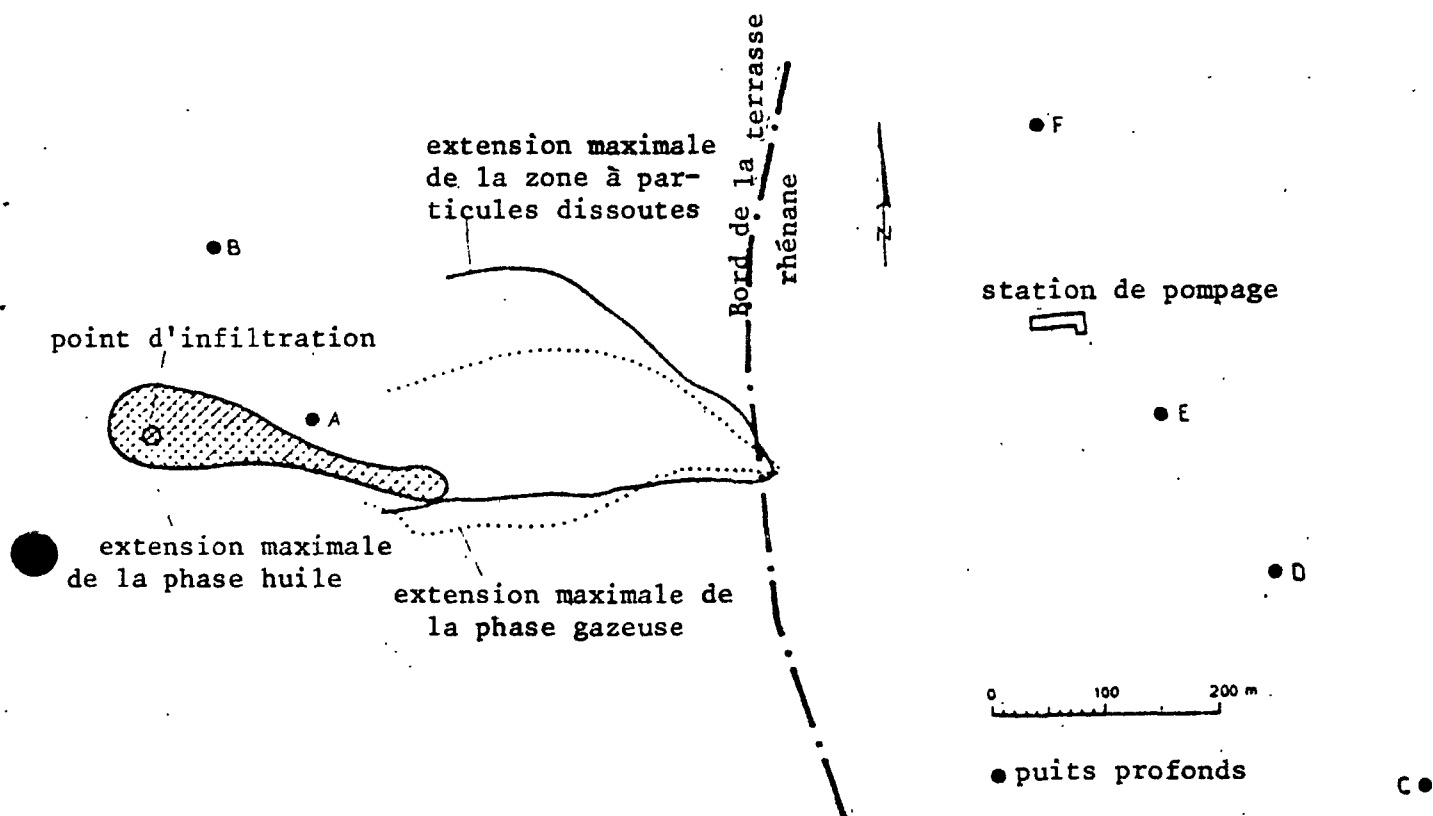


Fig. 4.35 : Cas Frankenthal. Répartition de l'huile (division en zones)

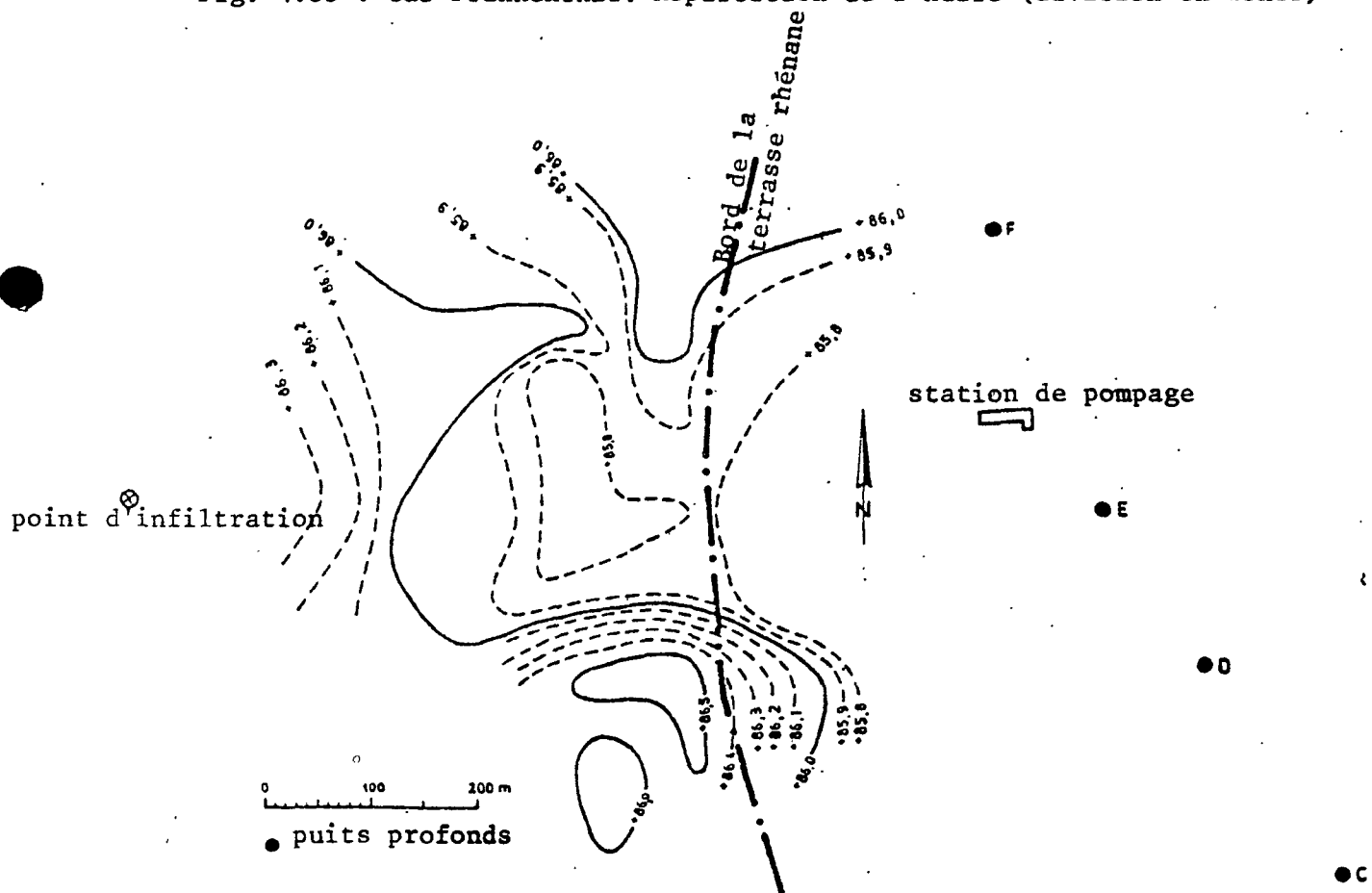


Fig. 4.36 : Cas Frankenthal. Courbes de niveau de la nappe phréatique.

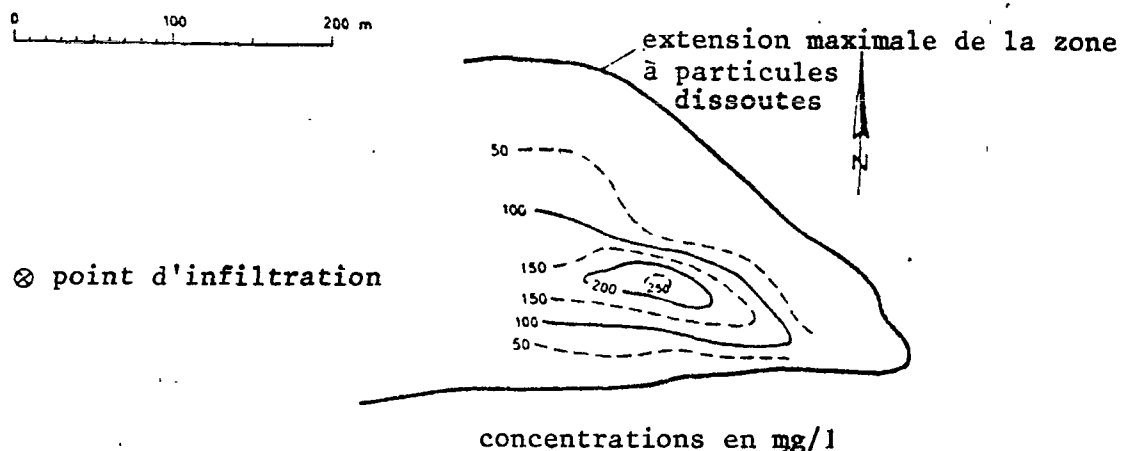


Fig. 4.37 : Cas Frankenthal. Répartition de la concentration des aromates dissoutes non polarisées (rapportée à la courbe testée de benzène) état 1974.

Jusqu'ici les particules dissoutes ne se sont pas répandues dans la basse terrasse. On ne peut pas dire si c'est un effet d'une dégradation biogénique ou du prélèvement de l'eau souterraine. Dans tous les cas, les dimensions et la répartition des concentrations de la zone à particules dissoutes n'ont guère varié au cours de 4 ans. Les puits profonds n'ont pas été affectés, conformément à l'attente. Au cours des mesures d'assainissement durant 5 ans on a récupéré en tout à peu près 93 m³ de benzène dans 13 puits. On ne connaît ni la quantité de benzène perdue, ni la durée des pertes.

Cas 14 : (vallée inférieure du Main) Russelsheim

A l'occasion d'une étude des fondations d'une station de distribution à l'intérieur d'une caserne on a constaté une forte pollution du sous-sol par fuel lourd Diesel. A proximité de la pollution se trouvait en surface un réservoir Diesel de 20 m³, équipé d'une prise. L'aire de service, remblayée de graviers, n'était isolée que très superficiellement. Le réservoir desservait environ 300 poids lourds par jour. D'après les observations, la négligence du service faisait perdre environ 1/2 l d'huile Diesel par camion.

A l'endroit des pertes, les sables pléistocènes atteignent plusieurs mètres. Les tamisages ont donné surtout des sables grossiers à fins avec une faible partie de sables fins et de graviers (fig. 4.38). La surface de la nappe se trouvait vers 4 m de profondeur. L'eau souterraine s'écoule avec une vitesse d'environ 0,5 - 1,0 m/d vers une station de pompage. La zone polluée se trouve dans la zone de protection éloignée (zone III) de la station.

Pour délimiter l'extension de la pollution de la nappe, on a foré 10 puits et points d'observation et en plus un puits de pompage. L'extension de la phase huile sur la nappe, large de 20 m et longue de 50 m, ouvrait près de 900 m². L'entonnoir de dépression du puits de pompage, profond de près de 0,6 m, dépassait l'extrémité de la flaque d'huile. Une 2e pompe, installée dans le puits, a permis de récupérer en 1/2 année environ 1,5 m³ d'huile minérale et de les enlever sans dégâts.

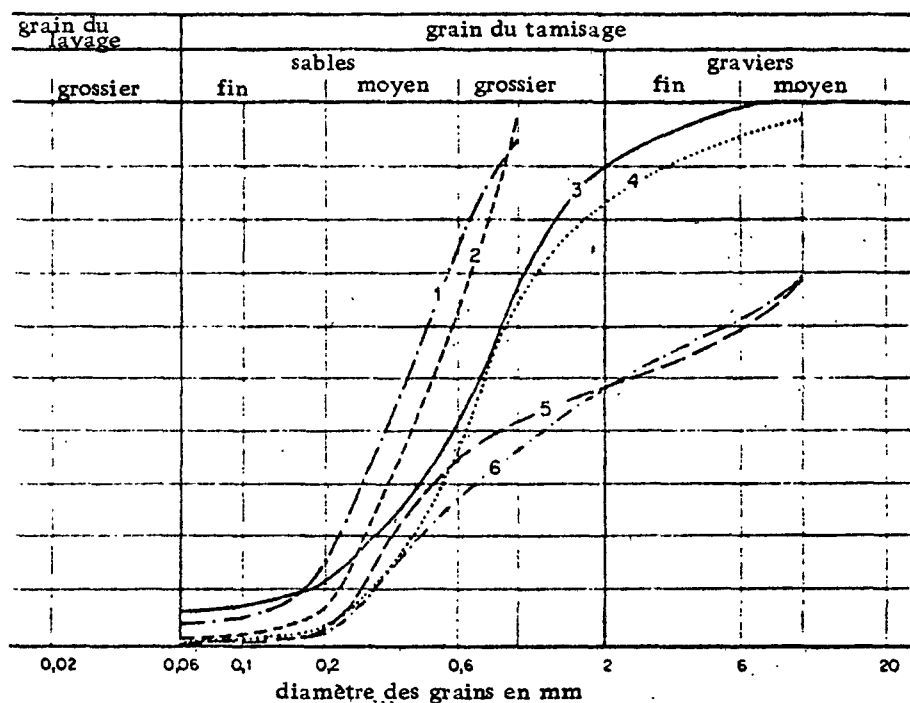


Fig. 4.48 : Cas Russelheim. Courbes cumulatives de la répartition des grains.

Pour éviter l'enlèvement des terres polluées demandé par le service des eaux, travail coûteux et non rentable, on a réalisé le lessivage du sous-sol avec une solution de détergent (Olitex 2000, dégradable à plus de 90 %). Le produit a été étendu d'eau dans la proportion 1:300. Après enlèvement d'une couche limoneuse de couverture sur environ 0,5 m au-dessus des sables. La solution a été répandue sur toute la surface au moyen de fossés et de tuyaux d'aspersion. Au total, 760 m³ de solution ont été infiltrés. Cette quantité correspond à peu près au double du volume des pores des sables entre la surface de la nappe et celle du sol.

La masse déversée a été adaptée au débit possible des pompes des puits (1,5 - 2 m³/h). L'infiltration a duré 22 jours. L'émulsion huile-détergent atteignait déjà après 3 jours le puits. Comme pour l'huile minérale, on observait une nette séparation de l'émulsion de l'eau, de sorte que l'eau pompée pouvait être déversée dans le réseau public.

L'émulsion a été dirigée vers un réservoir de collecte et traitée sans dégâts dans les installations de séparation d'une firme automobile. Le laboratoire de cette usine procédait à un contrôle continu de l'émulsion. Les teneurs en huile allaient en croissant durant 2 semaines de 1 vol. % à 1,6 vol. % pour ensuite décroître vers 0 au cours de 5 semaines environ. (fig. 4.39). Vers la fin de la 5e semaine, n'ayant plus constaté la présence d'huile, ni de détergent dans l'eau, l'écopage du puits fut arrêté. En tout on a retiré environ 700 m³ d'émulsion. La quantité enlevée du terrain était d'environ 3 m³ d'huile. Il n'est pas possible de faire des comparaisons quantitatives entre les masses infiltrées et celles récupérées, car on ne connaît pas les quantités perdues d'huile.

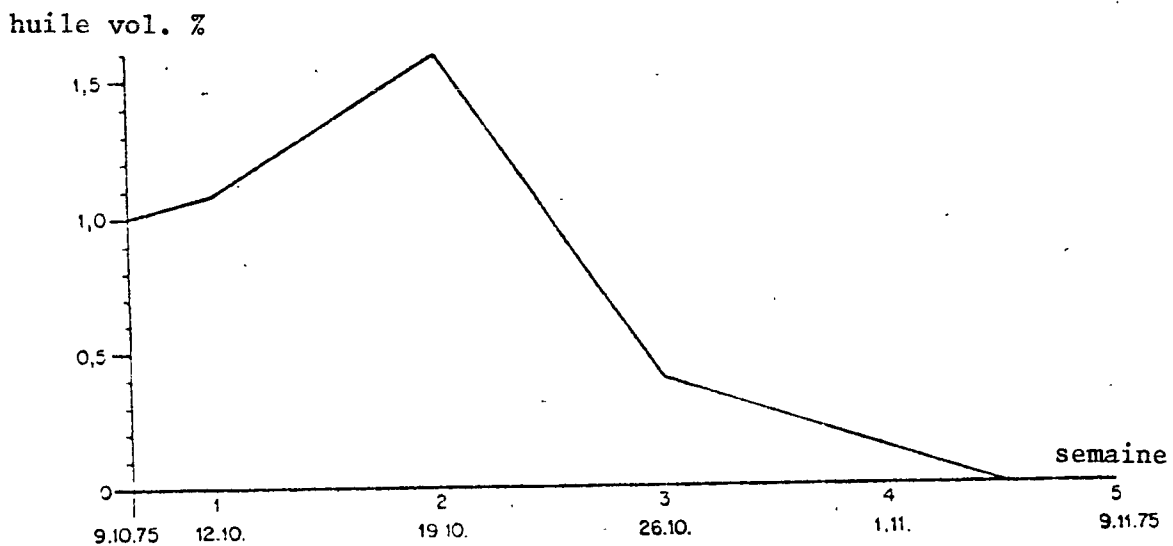


Fig. 4.39 : Cas Russelheim. Proportion d'huile dans l'émulsion.

Cas 15 : Francfort, port Est (région inférieure du Main)

Deux réservoirs très voisins laissèrent s'écouler en peu d'heures par quelques points défectueux 24,3 m³ de carburant Diesel, qui s'infiltraient dans le sous-sol jusque sur la surface de la nappe phréatique, située 1,5 m plus bas et s'y étalèrent. La masse d'huile a sans doute disparue dans la partie gauche de la coupe géologique, car le limon de débordement y est le moins épais et il a pu être crevé lors des travaux de terrassement (fig. 4.40). Tandis que l'huile a pu s'étaler sans difficulté vers la gauche, le plongement de la surface des limons a empêché son extension dans l'autre direction (vers la droite).

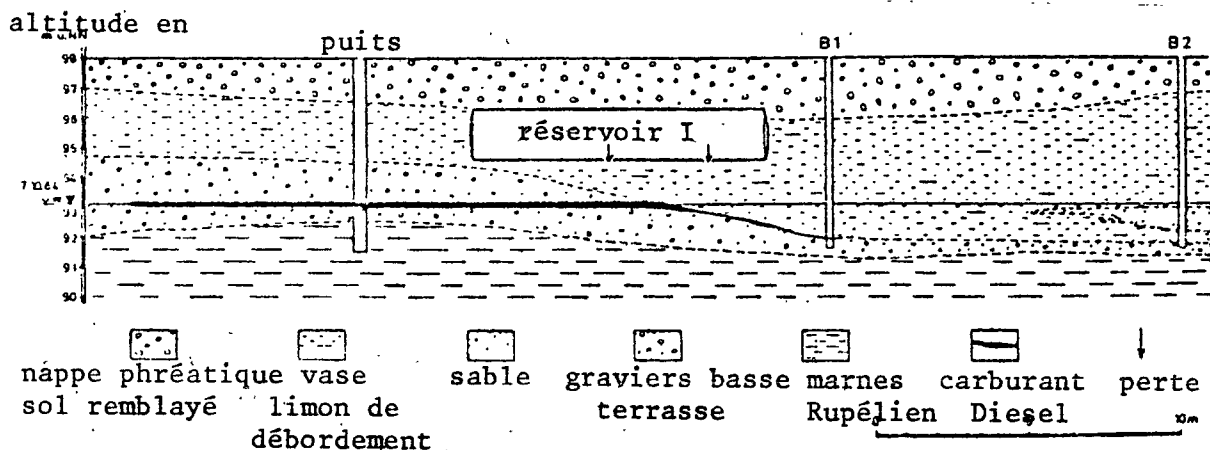


Fig. 4.40 : Cas Francfort, port Est. Coupe géologique.

Déjà 9 jours après les pertes, un puits d'écopage (Br) a pu être mis en service. Pour n'épuiser si possible que de l'huile, on n'abaissa la nappe que très peu. Dans l'espace de 22 jours on récupéra environ 33 m³ de mélange huile-eau. La portion d'huile était environ 16-19 m³, c'est-à-dire à peu près 70 % de la quantité écoulee. L'extension maximale de l'huile à la surface de la nappe phréatique était de 590 m² environ.

Cas 16 : Raunheim (plaine Rhin-Main)

Le 2.4.1974 on a constaté la présence de vapeurs à forte odeur d'hydrocarbures dans le transformateur profondément enterré d'une raffinerie. Les fouilles exécutées à la suite en bordure du transformateur ont montré la présence à environ 7 m de profondeur d'huile minérale au-dessus et sur la nappe phréatique. Une analyse montra qu'il s'agissait de pyronaphte (PN), un produit intermédiaire de la production d'essence ayant la composition suivante (%) : parafine (10), oléfine et dioléfine (12), benzène (16), toluène (15), xylène (8), éthylbenzène (1,5), aromates supérieurs (1,5), styrène (6) natphtène (4), non identifiés (14). La concentration de saturation a été fixée à 251 mg/l. La viscosité (10°C) est de 1,5 cSt, la densité de 0,83 g/cm³. La cause de la pollution PN reconnue par essai de pression, était un trou de 1 cm² environ dans une conduite en acier NW 150, protégée contre la corrosion par un revêtement bitumeux.

Le point de pollution est éloigné du Main d'environ 250 m, d'une série de 4 puits d'une entreprise Pharma de 650 m (puits M 1-4). De l'autre côté du Main se trouve, à une distance de 1,8 km, une prise d'eau publique, fournissant environ 14 Mio m³/an (série de puits H) (fig. 4.41).

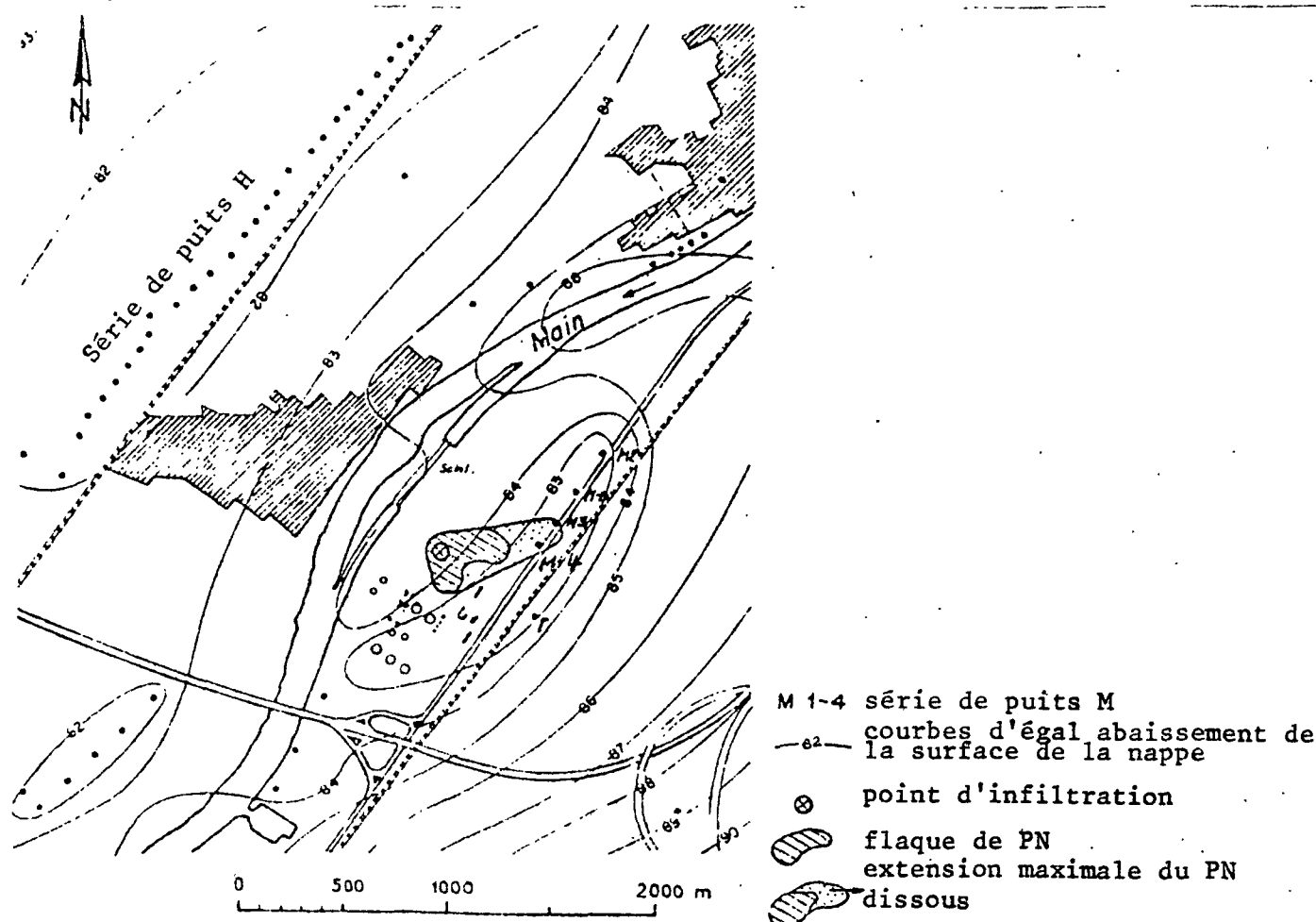


Fig. 4.41 : Cas Raunheim. Plan de situation.

Le sous-sol de la zone polluée, dans les zones non remblayées, est formé de 0,5 - 1,0 m de limon de débordement holocènes couvrant 20 - 30 m de sables, sables graveleux et graviers sableux, entrecoupés à divers niveaux de lentilles de vase. Plus en profondeur se trouvent plus de 100 m de sables pliocènes, à granulométrie variée et intercalations de graviers, argiles et vases. Les dépôts sablo-graveleux pléistocènes forment l'aquifère supérieur, séparé par endroits par des vases argileuses de l'aquifère inférieur, formé par les sables et graviers pliocènes. Etant donné la faible extension des intercalations de vases argileuses, il en résulte que les aquifères pléistocènes et pliocènes forment une unité hydrogéologique.

Le prélèvement d'eau souterraine dans les puits M1 - M4, (5-7 Mio m³/a) profonds de près de 60 m, implantée dans l'aquifère pliocène, est la cause de la formation d'un entonnoir de dépression, se répercutant sur l'ensemble de la formation. Cet entonnoir s'est étendu jusque sur le Main, de sorte que tout le terrain de la raffinerie et aussi le point de pollution se trouvent à l'intérieur de cet entonnoir. La série de puits H ne pouvait donc être menacée.

Les valeurs K des couches traversées se placent entre $2 \cdot 10^{-3}$ et $5 \cdot 10^{-4}$ m/s. La nappe phréatique se situe vers 7-9 m de profondeur, sa pente est de 5-6 %, sa vitesse d'écoulement entre 0,3 et 1,1 m/d.

Le réseau relativement serré des points de mesure montre que la flaque d'huile est longue de près de 400 m, large de près de 150 m. Leur éloignement du puits M4 est donc seulement de 200 m environ (fig. 4.42).

En 1974, on a constaté aux points de mesure des épaisseurs maxima d'huile dépassant 1 m. Jusqu'en 1978 elles ont diminué sensiblement. En raison de la forte solubilité du PN et de la découverte tardive des pertes, on constata dès le début des travaux la présence de PN dissous dans le puis M3 et surtout M4, de sorte que ces puits durent être mis hors service un certain temps, ou que l'eau ne pouvait être utilisée que pour refroidissement. L'extension du PN dissous s'étendait sur une longueur de 650 m environ et de 200 m de largeur environ. Tandis que le PN dissous s'étalait en direction du sens d'écoulement de la nappe vers le puits, le PN libre s'écoulait d'abord vers le SE et le SW, parallèlement aux courbes de niveau de la nappe pour, à l'approche des puits M, prendre la direction SE. La cause semble être la présence de sillons de graviers dans la masse des aquifères. L'extension de la phase huile vers le Sw (160 m), qui n'a été reconnue que très tard, est remarquable.

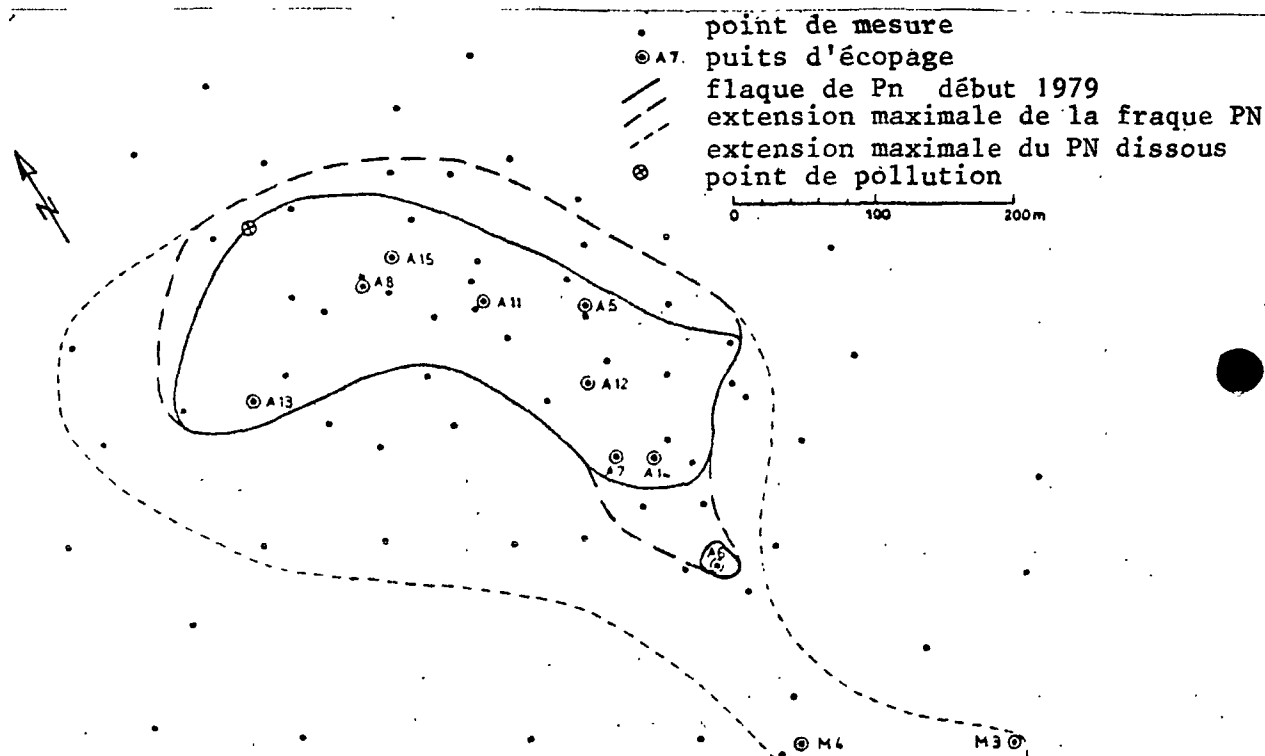


Fig. 4.42 : Cas Raunheim. Réseau des points de mesure. Répartition de l'huile.

La quantité de PN n'est pas connue, en raison de la nature des pertes, elle ne peut être estimée que superficiellement (maximum 4000 m³). La tache d'huile couvrait une surface de près de 60 000 m². L'utilisation des puits d'écopage a permis d'enlever environ 950 m³ de PN libre jusqu'à la fin de 1978. 50 m³ de plus ont été enlevés sous forme soluble.

Pour éviter l'extension du PN dissous des puits déjà pollués M3 et M4 vers les puits M1 et M2, on a d'abord arrêté le puits M3 et fortement abaissé le puits M4. Ainsi fut réalisée une séparation de la nappe phréatique entre les puits M1 et M2 à protéger et le puits M4 fortement pollué.

Pour reconnaître l'extension de l'huile et du PN dissous, on a foré en tout plus de 70 piézomètres Ø 150 mm. Leur profondeur varie entre 10 m à l'intérieur et près de la flaque d'huile et 30 m entre l'extrémité de la tache d'huile et la série des puits M1-M4. Les points de mesure ont été équipés d'abord de filtres PVC, plus tard, en raison de l'extrême agressivité du PN de filtres à ponts rayés étamés.

On a d'abord recherché par spectroscopie IR des méthodes codifiées allemandes les hydrocarbures aliphatiques et le benzène dans les échantillons d'eau des puits et des points de mesure. Cette méthode fut reconnue insuffisante, car on retrouva à l'amont du point de pollution des hydrocarbures dont la présence ne pouvait être attribuée à la pollution PN. On appliqua alors comme méthode spécifique de recherche de pollution PN la chromatographie gazeuse Headspace. Dans les échantillons furent trouvés du benzène, du toluène, du xylène et du styrène. Seuls le xylène et le styrène furent pris en compte pour le calcul de la proportion du PN dans l'eau souterraine préalablement polluée.

Pour empêcher une plus grande extension du PN dans la nappe on a d'abord foré 4 puits d'écopage dans la flaque de PN. Bien que leur emplacement n'était pas idéal à l'intérieur de la raffinerie, on a constaté que le PN ne s'était pas étalé jusque vers le milieu de 1978. L'ensemble de ces puits, selon leur emplacement dans la flaque de PN et selon la position de la nappe, a fourni jusqu'à 45 m³ de PN par mois. Pour accélérer l'enlèvement du PN, on a installé en 1979 d'autres puits. Entre l'extrémité de la flaque PN et le puits M4 on a équipé un autre puits (A6). Il ne devait servir qu'en cas de besoin, mais il a été utilisé entre-temps pour enlever le PN dissous.

Les puits d'écopage ont été forés à sec jusqu'à une profondeur de 16-20 m et équipés de filtres à pont rayés en acier NW 1000. La fig. 4.43 représente le schéma de ces installations. Deux pompes furent installées par puits. Une pompe immergée, exploitée en débit continu de 50-70 m³/h, provoque un entonnoir de dépression, profond de 2-3 m et de 30-40 m de rayon. Le PN arrivant au puits est enlevé par intermittence avec une pompe aspirante et déversé dans un récipient ; après mesure, il retourne à la production. Une soupape de régulation pneumatique permet de maintenir l'abaissement du puits à un niveau constant, indépendant des fortes variations de la nappe à proximité du Main. L'enlèvement du PN peut donc se faire automatiquement sans changement de la profondeur de la pompe PN. Une partie de l'eau souterraine enlevée sert à faire fonctionner la pompe aspirante hydraulique enlevant le PN.

A cause de la forte agressivité du PN envers les produits synthétiques et le butchouc, toutes les conduites d'arrivée et de départ des pompes sont en teflon. Les coussinets des pompes sont en métal ou en teflon. L'eau enlevée (100.000-150.000 m³/mois), fortement polluée par PN (jusqu'à 100 mg/l), est évacuée sur le bassin de décantation de la raffinerie. En raison de la capacité réduite du bassin de décantation, on a créé un nouveau type de puits, un "puits double", dans lequel un puits profond de 40 m est engagé dans un puits plus large, profond de 20 m (fig. 4.44). Ces deux puits sont isolés l'un de l'autre par un bouchon d'argile placé vers 21-28 m dans des lentilles d'argile. Ces lentilles d'argile empêchent que dans l'aire de pompage les courants verticaux ne puissent entraîner du PN vers les profondeurs. En raison des difficultés d'étanchéité, le puits intérieur est soudé d'une pièce.

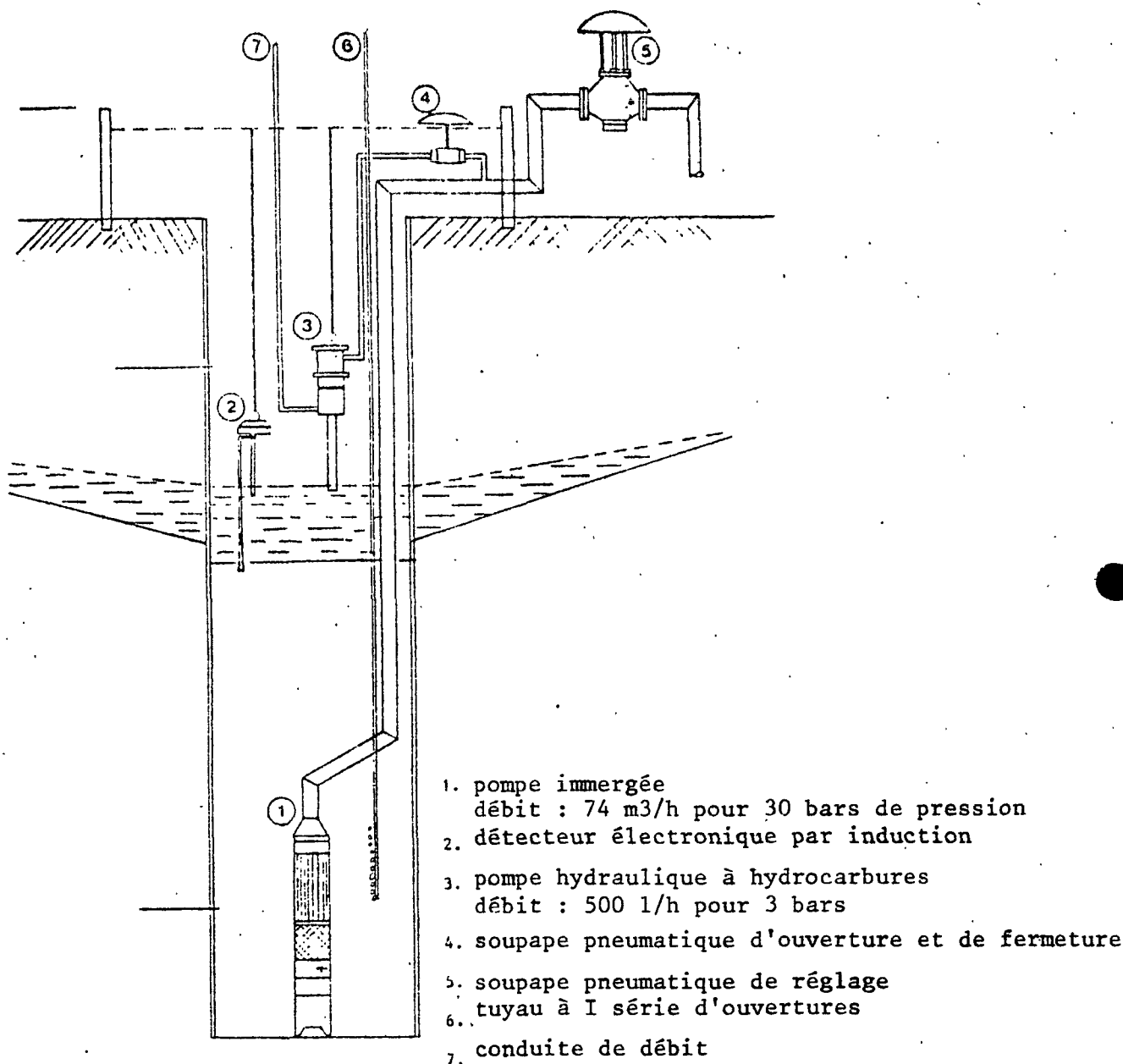


Fig. 4.43 : Cas Raunheim. Schéma des puits d'écopage (système à 2 pompes).

Le puits double est équipé de 3 pompes, au débit de 50-70 m³/H et un abaissement de 2-3 m par la pompe immergée I (puits intérieur) et la pompe immergée II (puits extérieur): il se produit un cône de dépression unique en raison de la faible extension de la lentille d'argile. Une pompe PN III (puits extérieur) enlève le PN accumulé comme dans le type de puits déjà mentionné. Dans ce cas, environ 1/3 seulement de la quantité accumulée est aspirée par la pompe supérieure II. L'eau enlevée ici est fortement polluée par le PN dissous, elle est envoyée au bassin de décantation. 2/3 de la masse totale puisée sont enlevés par la pompe I. L'eau souterraine enlevée ici n'est pas polluée par du PN, elle est utilisée dans la production ou envoyée sans épuration dans le Main. Grâce à ce type de puits on a pu abaisser des 2/3 l'eau souterraine polluée à épurer.

En raison de la forte solubilité du PN dans l'eau souterraine, on observe à l'intérieur de l'aquifère un important départ biogène de l'oxygène et des phénomènes de réduction, diminuant fortement la durée de fonctionnement des puits. Ainsi les filtres rayés des puits A5 et A7 plongés dans l'aquifère, étaient corrodés par divers sulfures métalliques, surtout des sulfures de fer, de manganèse et de zinc, ou bouchés. De plus, les filtres se trouvaient bouchés par des polymères de PN à l'intérieur de la zone d'oscillation du PN. Les réactions de réduction sont si intense, qu'elles aboutissent à la formation d'hydrogène sulfurée et même de soufre.

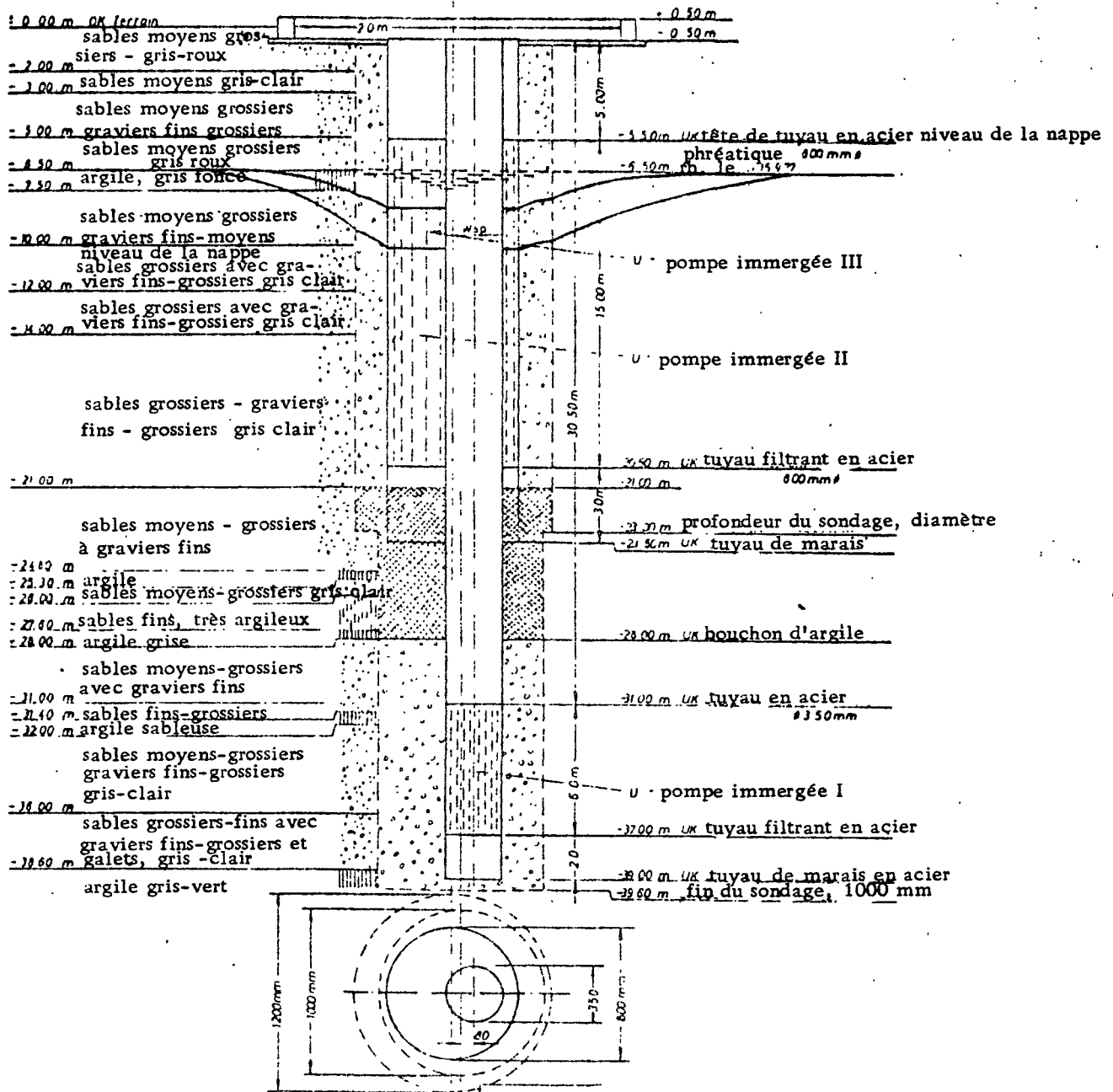


Fig. 4.44 : Cas Raunheim. Schéma du puits double (système à 3 pompes).

Des sondages autour des puits ont montré que les sables et les graviers sont colmatés sur 2 m par des remblais. Ces sondages ont été motivés par une extension surprenante de la flaque PN jusqu'au puits AB. En abaissant de façon constante et automatique le niveau de la nappe par le puits A7 sur le bord de la flaque PN, on a constaté une diminution progressive de la production de PN. Celle-ci a été expliquée par une diminution progressive de l'apport de PN à partir de la zone polluée. En réalité le puits se colmatait de plus en plus, de sorte que le niveau de la nappe s'abaissait malgré le débit sensiblement moindre et que cet abaissement ne se répercutait pas en dehors du puits. Le PN pouvait ainsi contourner le puits. Ceci montrait donc qu'il faut non seulement mesurer la position de la nappe, le produit enlevé, mais aussi mesurer constamment la quantité d'eau enlevée.

Les dégâts se sont élevés à 3 Mio DM jusqu'à la fin 1978. Au total, jusqu'à l'assainissement définitif la dépense est estimée à 20 Mio DM.

Cas 17 : Zone industrielle X (région Rhin-Main)

Dans le cadre des recherches préliminaires de la construction d'un point dans la zone industrielle, traversée par des voies ferrées, d'une ville de la région Rhin-Main, plusieurs sondages carottés ont rencontré de l'huile minérale noire à la base de l'aquifère poreux et au contact d'argiles vaseuses du sous-sol. En vue d'une reconnaissance précise on a par la suite, à des distances de 30-70 m et jusqu'à une profondeur de 12 m, foncé 86 sondages tubés, permettant de délimiter et de préciser l'origine de la pollution (fig. 4.45).

Située vers l'altitude de + 106 m NN, la région considérée est sensiblement horizontale. La partie superficielle du sous-sol est formée de 8-12 m de sables et graviers d'une terrasse fluviatile quaternaire, reposant sur des vases argileuses et des sables vaseux, avec intercalations locales de lignites d'âge tertiaire récent. Les courbes de niveau montrent que la surface des couches d'argiles vaseuses s'abaissent du bord oriental, situé vers + 98 NN, en direction M et SM avec une pente moyenne de 0,9 % jusque vers 93,5 NN ; de nombreuses dépressions et des creux permettent d'y reconnaître une ancienne pénéplaine préquaternaire différenciée.

Les graviers et sables sont gorgés d'eau, se situant vers 102 m NN dans la partie E, vers 101 m dans la partie SW, s'écoulant donc en gros vers le SW.

L'huile minérale rencontrée est un liquide noir, peu visqueux, à forte odeur de carbolinéum, dont la couleur, sous des épaisseurs inférieures à 1 mm, tend vers le gris brun et qui, sous forme de fine pellicule montre les teintes irisées brillantes de l'arc en ciel. La densité est de 1,08 à 20°C. Le mélange aqueux, fortement secoué, se sépare après quelques minutes de repos en deux liquides, à surface de séparation nette. L'analyse (résultat moyen de 2 essais) a fourni la composition suivante :

Composés volatils à moins de 200°	1,7 %	cabazol, méthylphénathrène	
aromates volatils à moins de 210°	2	méthylantracène	5
naphtaline et associés	7,2	fluoranthène	3
méthylnaphtaline	5	pyrène	
diphényl et diméthylnaphtaline	5	benzofluorène et associés	2,7
acéaphthène	3	chrysène et associés	1
diphényloxyde et associés	4,5	composés volatils entre 300 et 400°C	0,5
fluorène	3,5		
méthylfluorène et associés	6	composés volatils entre 450 et 500°C	1,7
diphénylesulfure	1		
phénanthrène et anthracène	10	produits condensés non volatils	34

Il s'agit donc d'un mélange compliqué d'hydrocarbures cycliques, comme il s'en produit dans la distillation des bitumes de houille sous forme de goudrons.

En raison de son odeur intense et caractéristique, le goudron a été reconnu dans tous les forages et sondages. Il a toujours été rencontré à la limite des graviers et de l'argile en couches épaisses de quelques om à plusieurs dm. Dans un seul sondage, situé dans la partie Est de la zone étudiée, à proximité SW d'un réservoir aérien (fig. 4.45), on a trouvé une pollution par huile allant de la surface du sol jusqu'à la base de la nappe phréatique. Pour recueillir les échantillons, il s'est avéré avantageux de pousser le sondage jusque dans les argiles sous-jacentes, lors du relevé des tubages, l'argile formant bouchon, empêchait la perte des sédiments meubles de la partie superficielle du tubage.

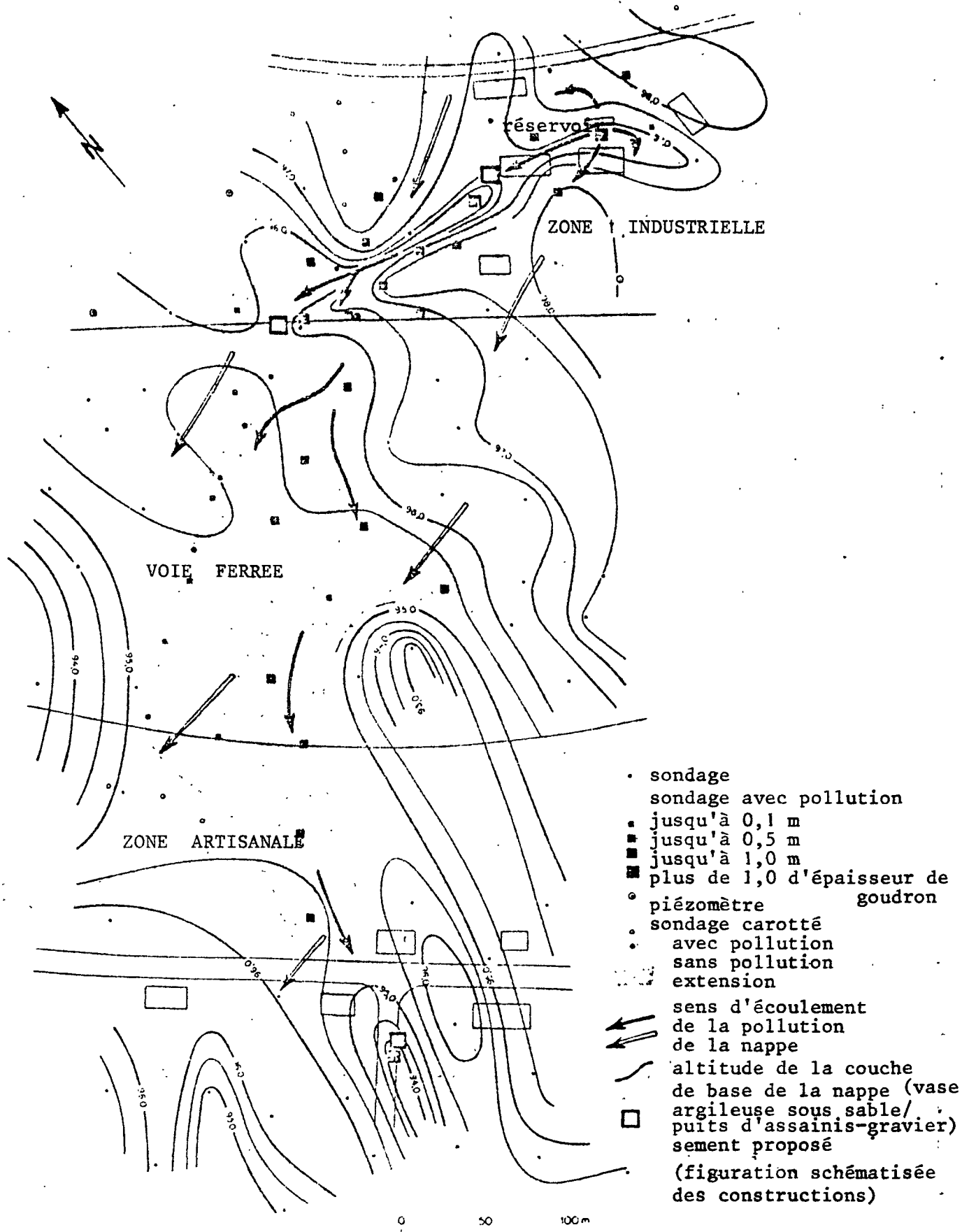


Fig. 4.45 : Cas de la zone industrielle X. Plan de situation. Topographie de la base de l'aquifère et extension de l'huile.

La répartition spatiale du goudron montre une relation étroite entre l'extension de l'huile et la topographie de la surface de l'argile recouverte par les sédiments de la terrasse. La présence de goudron débute 20 m au Sud, quelques dm sous le point culminant de la couche basale de la nappe. Déjà 50 m à l'W de cet endroit, le goudron s'étend sur une largeur de 90 m environ, 70 m plus loin il couvre sur 3 m d'épaisseur une dépression assez profonde. Environ 130 m plus loin, le goudron n'atteint plus que 0,20 - 0,50 m d'épaisseur sur une largeur de 160 m, couvrant la surface tabulaire de l'argile dans le domaine de la voie ferrée et au-dessous de la courbe 96 m NN ; 250 m plus loin le goudron dévie en direction SW. Dans une dépression en forme de sillon, située 200 m plus loin, on a pu montrer la présence d'environ 2 m d'huile. Au S et au SW de ce point, l'argile ne se rencontre qu'à des altitudes plus élevées et sans goudron. Le sens d'écoulement du goudron dépend donc de la pente de la couche basale de la nappe et non du sens d'écoulement de la nappe ; par endroit ils se recoupent à angle aigu.

Au total, la pollution atteint une longueur de 750 m environ et couvre une surface de 70 000 m². A partir des épaisseurs relevées de goudron on peut estimer que 20 000 m³ de terrain ont été pollués, ce qui, d'après la porosité et en tenant compte de la saturation en huile, permet d'estimer la masse d'huile entre quelques centaines et quelques milliers de m³ d'huile.

L'infiltration du goudron a, sans aucun doute, débuté à l'extrémité Est de la zone polluée, probablement à l'emplacement du réservoir, où toute l'épaisseur des graviers est noircie par le goudron. Un atelier industriel y stocke depuis plusieurs décennies du goudron, en utilisant environ plusieurs centaines de m³ par an. Mais, selon les dires de la direction, on n'y a décelé aucune perte jusqu'ici. Sans en connaître le détail on doit admettre que des pertes par petites quantités ont dû se produire durant des temps assez longs, le goudron s'est infiltré dans les sédiments très perméables de la terrasse fluviale.

Etant donné que la pollution recoupe la voie ferrée où durant la guerre stationnaient des wagons-citernes, on peut supputer que lors des bombardements, certaines citernes éventrées ont pu se vider et que leur contenu s'est ajouté au courant de goudron venant du Nord. En raison de la continuité des flaques de pollution sur les deux aires, cette supposition est pourtant peu probable.

Pour l'instant on n'a pas expliqué pourquoi le goudron ne s'est pas étalé sur le plateau en direction Est et Ouest vers les sillons déprimés de la surface des argiles vaseuses. Cela peut être dû à la présence de sillons non reconnus ou à la plus grande porosité de l'aquifère sur le parcours pris par le goudron.

Après la fin de la reconnaissance de la pollution par le goudron il est prévu de récupérer une partie du goudron infiltré aux endroits où il est le plus épais au moyen de plusieurs puits d'assainissement. Comme pièges à huile on a prévu des puits forés jusque dans la couche basale de la nappe et dans lesquels le goudron s'infiltrerait et s'accumulerait au fond grâce à sa plus forte densité, on y placerait le tuyau de la pompe de marais. En raison de la forte différence de densité du goudron et de l'eau, le pompage pourra se faire à intervalles échelonnés selon les arrivées. Etant donné qu'aucune dépense n'est à engager pour abaisser la nappe, il est à prévoir que les dépenses d'assainissement seront très inférieures à celles prévues pour des huiles légères.

Il est prévu de surveiller la répercussion du goudron sur l'eau souterraine le surnageant avec plusieurs puits de contrôle à planter dans le courant d'eau souterraine de la zone polluée. De plus est prévu un puits de contrôle foré jusque dans un étage aquifère inférieur.

Cas 18 : Würzburg (Main)

A l'occasion d'un contrôle de routine des réservoirs à essence dans le nouveau port de Würzburg, un déficit de 15 m³ maximum d'essence fut constaté. Les recherches introduites à la suite pour localiser les pertes conduisirent à la découverte d'une inétanchéité dans une canalisation souterraine entre les réservoirs et la station de remplissage. En cet endroit l'essence s'infiltrait dans l'aquifère. Le début et la durée des pertes ne sont pas connus. Il est supposé qu'elles se sont poursuivies durant un assez long temps.

Les sondages ont permis de délimiter la flaque d'huile avec assez de précision. Il est surprenant que l'essence ne s'était pas étendue dans la direction d'écoulement de la nappe souterraine, mais sensiblement dans une direction perpendiculaire vers le mur du quai limitant l'aquifère (fig. 4.46). Il apparaissait que l'essence avait suivi les dépôts plus perméables d'un ruisseau latéral entaillant les dépôts du Main dans cette direction.

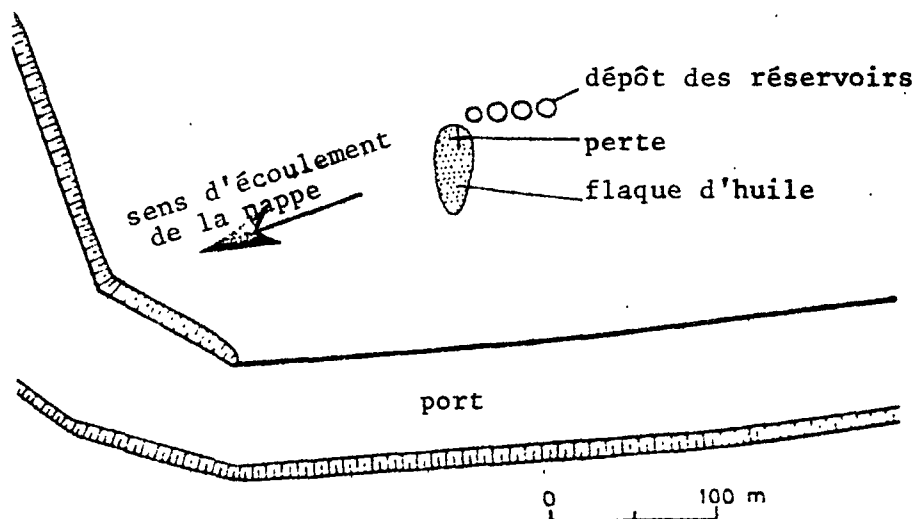


Fig. 4.46 : Cas Würzburg. Esquisse de la situation.

Un puits de récupération, profond de 5 m, en buses de béton de 1,5 m de diamètre, a été implanté à l'endroit des pertes. Le niveau d'eau de ce puits se situait à 3,8 m du sol. A l'achèvement de ce puits, la couche d'essence y atteignait environ 0,5 m. Par pompage intermittent on y récupéra durant les 5 premiers jours plus de 11 m³ d'essence. Après 3 1/2 mois les arrivées d'essence s'étant abaissées à des traces, le pompage fut arrêté, 22 m³ avaient été récupérés, c'est-à-dire 50 % de plus que prévus. La comparaison entre les quantités récupérées et les pertes estimées d'après les bilans de l'installation montre combien ces estimations peuvent être erronées. Il faut donc faire des réserves sur les pertes estimées.

Cas 19 : Aalen (Jura souabe)

Le 11 avril 1973, à l'occasion de fouilles à proximité de l'immeuble, rue du moulin 33/1, on a constaté que le sous-sol était imprégné d'huile. Le propriétaire situé immédiatement à l'amont du terrain a un dépôt de réservoirs d'huile minérale. La société de surveillance n'a pu constater aucune perte dans les réservoirs et dans les conduites, mais des sondages ont néanmoins montré, par endroits, des pollutions massives d'huile minérale dans le sous-sol (fig. 4.47). En même temps on a constaté une pollution plus faible par huile de la nappe d'eau souterraine près de la station d'essence à l'ouest de la rue du moulin.

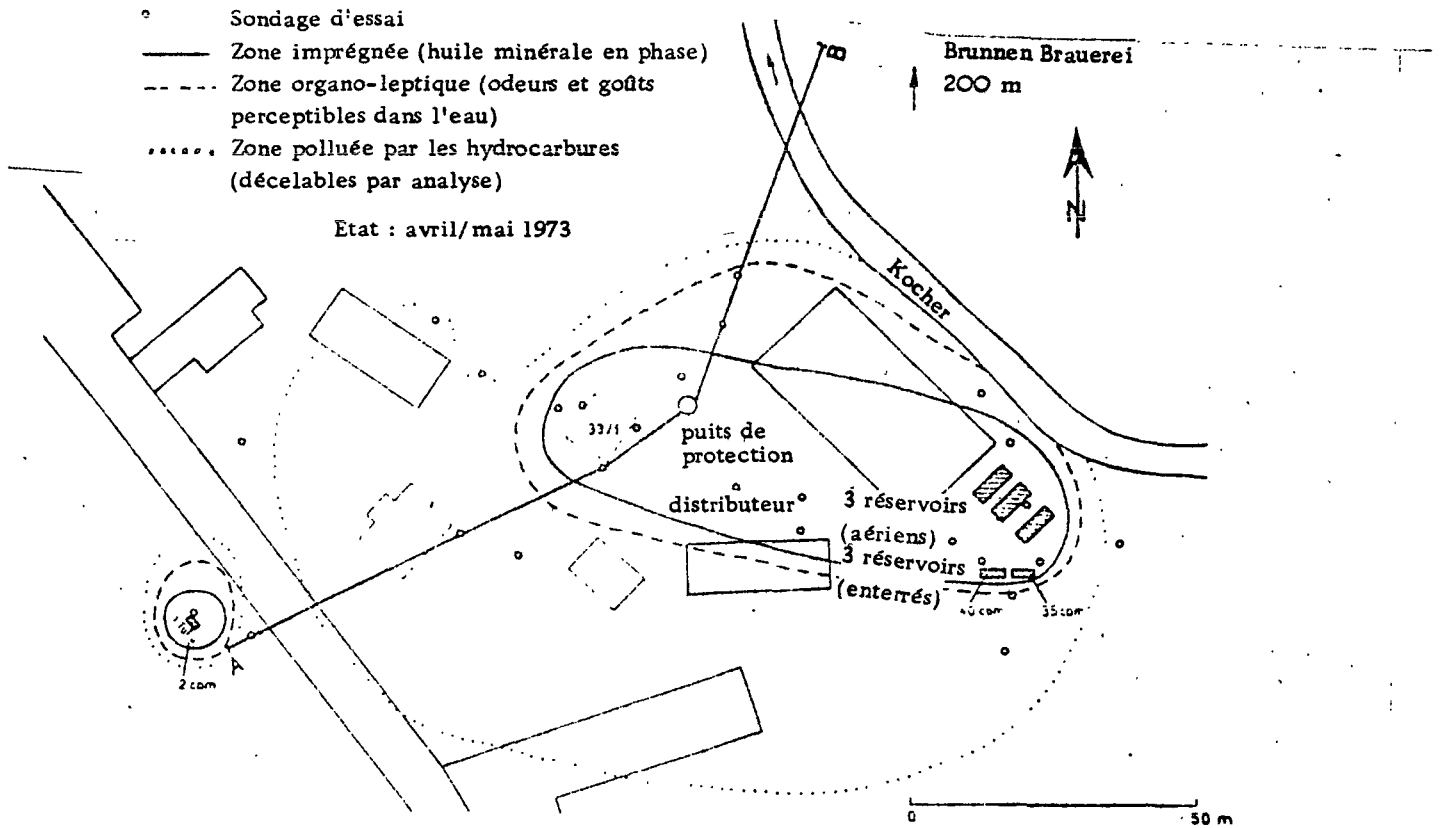


Fig. 4.47 : Cas Aalen. Esquisse de situation.

L'eau souterraine s'écoule avec une pente de 4 ‰ environ en direction NNE sous un angle aigu vers la Kocher. Le puits de protection, au diamètre de 2 m et profond de 3,5 m, a pu être mis en service dès le 25 avril 1973. Les conditions géologiques sont représentées dans la fig. 4.48. Le noyau de l'aquifère imprégné d'huile est entouré de zones dans lesquelles la pollution ne peut être démontrée que par les critères organoleptiques ou par l'analyse. Dans le puits de protection, le niveau de la nappe a pu être abaissé au maximum de 1,5 m. Dès lors, on avait atteint la base de l'aquifère épais de 1,5 m seulement ; un abaissement plus fort n'entraînait pas de nouveaux apports. En tout 7000 m³ d'eau ont été pompés jusqu'à la fin octobre 1973 en récupérant environ 2,5 m d'huile minérale.

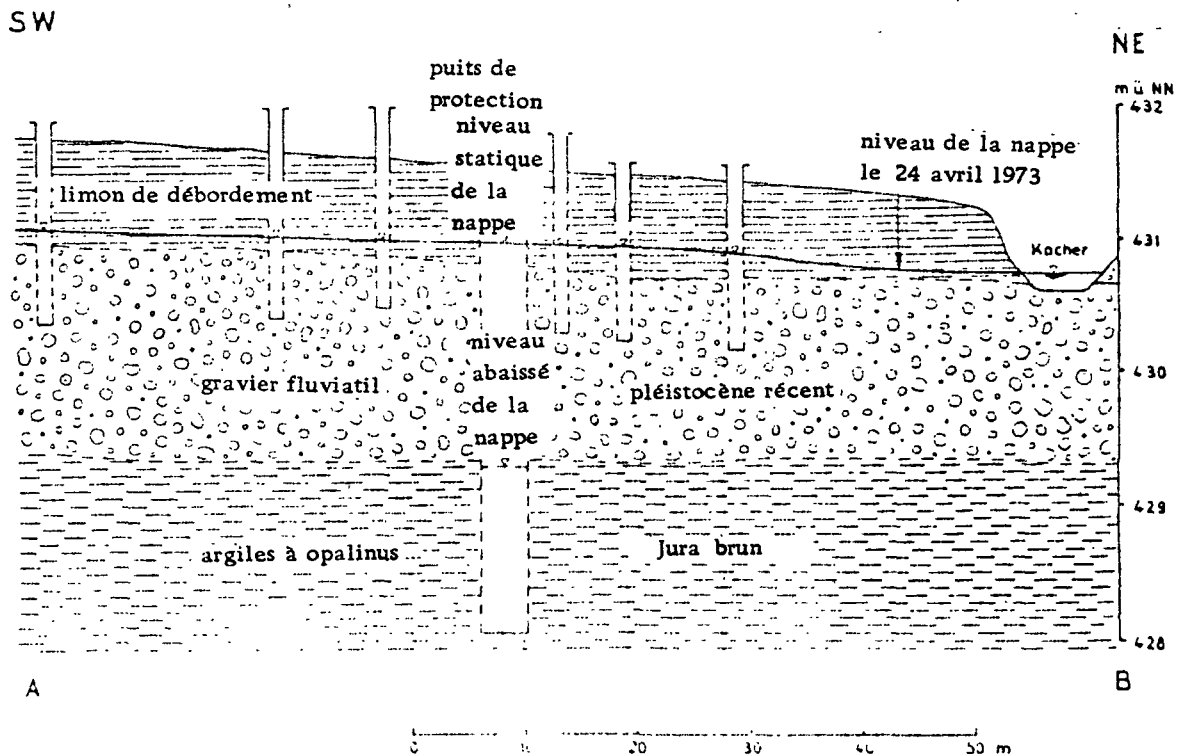


Fig. 4.48 : Cas Aalen. Coupe géologique.

La phase d'huile minérale était, d'après l'examen par chromatographie gazeuse, composée de distillats moyens et aussi d'essence. Un échantillon du 3.5.1973 a donné 80 % d'essence et 20 % de distillats moyens, un échantillon du 26.9.1973 50 % d'essence et 50 % de distillats moyens. On peut en déduire que l'essence se dégrade plus vite que les distillats moyens. Ceci est certainement un effet de l'évaporation intense de l'essence.

Peu après la mise en service du puits de protection, on a constaté une intense activité biologique dans l'eau enlevée et dans la phase d'huile minérale entraînée. Cette activité se faisait remarquer au séparateur d'huile par l'accumulation de masses biologiques sous forme de pellicules flottantes. Un échantillon du 24.8.1973 contenait des cocci, des bacilles, ainsi que des algues non identifiées. Ces pellicules biologiques contenaient de nombreuses gouttelettes d'huile. C'est la raison pour laquelle, au cours de cette phase d'épuration, la séparation de l'huile minérale présentait des difficultés.

Une analyse de l'eau prélevée le 24.8.1973 dans le puits de protection a donné par comparaison avec celle d'une eau non polluée d'une brasserie située 200 m plus loin les résultats suivants :

	Puits de protection de la rue du moulin	Puits de la brasserie
Dureté totale (mval/l)	10	6
Ammonium (mg/l)	0,5	sous 0,1
Nitrate (mg/l)	0,2	12
Nitrite (mg/l)	0,08	sous 0,02
Sulfate (mg/l)	40	40
Fer (mg/l)	7,3	sous 0,1
Manganèse (mg/l)	3,1	sous 0,05
Résidu sec (mg/l)	936	400
Oxygène (mg/l)	1,9	10
Gaz carbonique libre (mg/l)	52	20
Hydrogène sulfuré (mg/l)	0,3	sous 0,1
Besoin en oxygène avec permanganate (mg/l)	6	1
Phénols	0,11	sous 0,001
Hydrocarbures : benzène	0,044	0
toluène	0,055	0
éthylbenzène	0,010	0
autres hydrocarbures	0,223	0
Seuil perceptible au goût	250 x	0
Température	13,6	8,5

Cette analyse révèle les changements importants de la composition de l'eau souterraine comme suite de la pollution par huile et de la forte activité microbiologique de l'aquifère : dégradation des carbures d'hydrogène avec utilisation de l'oxygène libre ou des nitrates ; comme produits de dégradation on a : nitrites, hydrogène sulfuré et gaz carbonique libre. A la suite de l'utilisation de l'oxygène le potentiel Redox est abaissé, en même temps que le fer et le manganèse de l'aquifère sont dissous en concentrations élevées. Le CO₂ libéré par la dégradation des hydrocarbures exerce une action dissolvante et entraîne par la suite une augmentation de la dureté et du résidu sec. La teneur en carbures d'hydrogène surtout aromatiques de 0,332 mg/l entraîne un besoin en oxygène chimique de 6 mg/l. La teneur en phénols est un excellent indicateur du degré de pollution. Sur 5 prélèvements différents on a observé des valeurs variables.

Date des prélèvements	Teneur en phénol (mg/l)
9 mai 1973	196
24 août 1973	114
16 mai 1974	111
25 septembre 1974	258
21 mai 1975	107

Il est possible que la dégradation biogénique ait entraîné l'augmentation de 5° C de la température de l'eau souterraine.

Etant donné que les arrivées d'huile dans le puits de protection cessèrent à partir du 18 octobre 1973, les travaux de protection ont été arrêtés le 7 novembre. On a pompé à nouveau 750 m³ d'eau du 12 au 25.8.1974. Aucune huile minérale ne s'y trouvait, de sorte que la pollution fut alors considérée comme assainie.

Cas 20 : Ravensburg (avant-pays alpin souabe)

Le 17 février 1979 on a constaté près du réservoir d'une installation de chauffage central d'un petit atelier que la canalisation de retour n'était plus étanche. Il fut alors établi que, durant près de 4 mois, entre 18 et 23 m³ de fuel s'étaient vidés.

Le sous-sol y est formé de graviers glaciaires dont l'épaisseur diminue en direction ouest vers le centre du bassin. La station de pompage Ravensburg, située 900 m à l'ouest de la porte, y prélève l'eau potable (fig. 4.49 et 4.50).

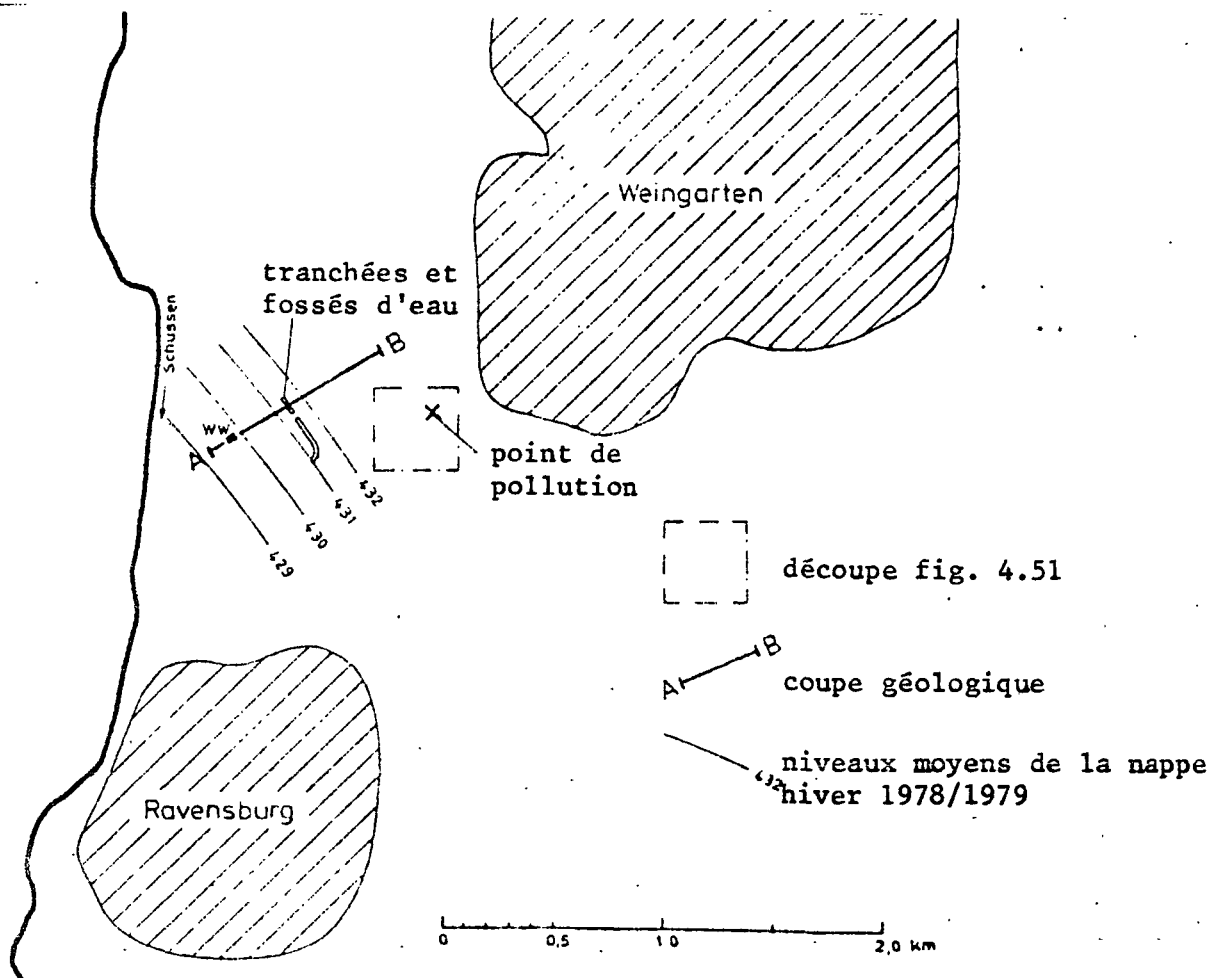


Fig. 4.49 : Cas Ravensburg. Plan d'ensemble de la situation

Dès la connaissance des pertes d'huile, la station de pompage fut arrêtée de suite. Un premier puits de protection fut creusé près des pertes et mis en service le 8 mars. En même temps, des piézomètres furent placés jusqu'à 200 m de distance des pertes en direction W et SW (fig. 4.51). La vitesse moyenne des écarts de la nappe est de 10-15 m/d dans l'aire polluée. Etant donné la crainte d'un déplacement de l'huile dans les dépôts grossiers glaciaires en direction de la station de pompage, on a creusé un fossé piège dont les parois ont été revêtues de feuilles de plastique.

SW

- 50 -

NE

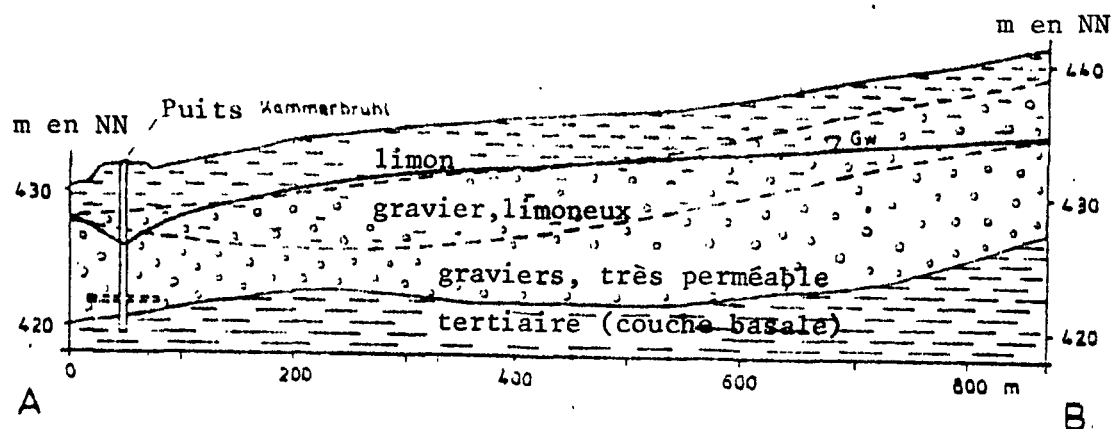


Fig. 4.50 : Cas Ravensburg. Coupe hydrogéologique allant du puits à la zone polluée. Au repos la nappe est tendue au voisinage du puits.

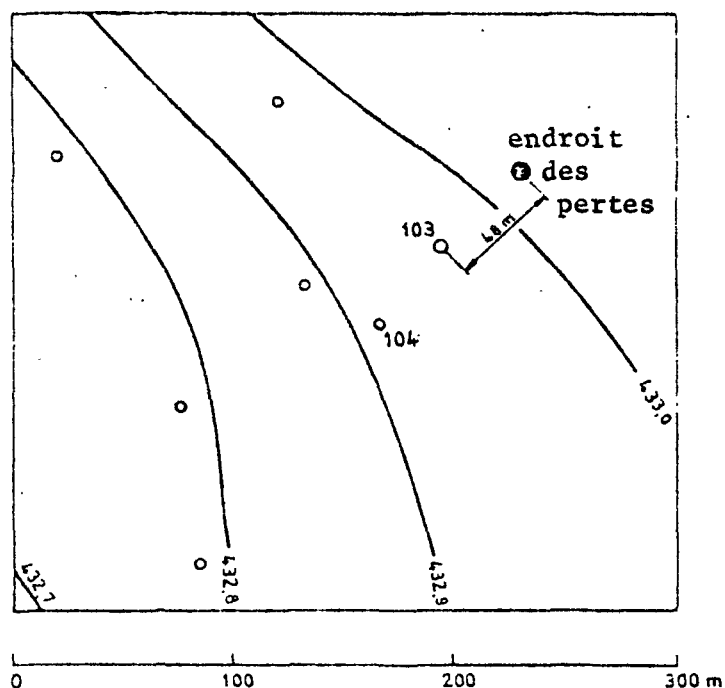


Fig. 4.51 : Cas Ravensburg. Plan de situation des piézomètres des environs immédiats de l'endroit des pertes. Courbes d'équilibre de la nappe le 9.4.1979.

Les analyses faites en même temps par différents analystes pour rechercher les hydrocarbures dans l'eau ont d'abord donné des résultats contradictoires. La raison en était les perturbations par les huiles de graissage et les graisses épaisses utilisées dans les travaux de dragage, de forage et de tubage. Il y avait en plus des difficultés de prélèvement des échantillons d'eau dans des tubes trop étroits et dans des nappes profondes.

Ce n'est qu'après avoir fait appel à un laboratoire de recherche, ayant l'habitude de vaincre de telles difficultés, que l'on a pu se faire une image exacte de l'influence réelle de l'huile minérale sur l'eau souterraine. Les analyses par spectrographie infrarouge ont montré que seul le piézomètre 103, placé à 48 m en direction SW, donc à l'aval de la perte, avait été nettement affecté par l'huile minérale. Les teneurs suivantes en hydrocarbures y furent constatées :

Dates	mg/l
20 mars 1979	0,245
26 mars 1979	0,161
11 juin 1979	0,130
9 octobre 1979	0,291

Tous les autres points de prélèvement d'eau souterraine n'ont montré qu'une charge fondamentale en hydrocarbures naturels, en moyenne de 0,04 mg/l (fig. 4.52). La légère pollution du piézomètre 103 était démontrée, en dehors de la spectrographie infrarouge, au début de la pollution, par une teneur plus élevée en phénol de III microgramme/l contre une teneur fondamentale I microgramme/l ou moins. Enfin l'examen organoleptique de l'eau prélevée dans le tuyau 103 donnait encore une odeur et un goût tout juste perceptibles de fuel domestique. Si on déduit de la valeur moyenne des 4 évaluations d'hydrocarbures du tuyau 103 (0,20 mg/l) la charge fondamentale de 0,04 mg/l, il reste un apport étranger de 0,16 mg/l).

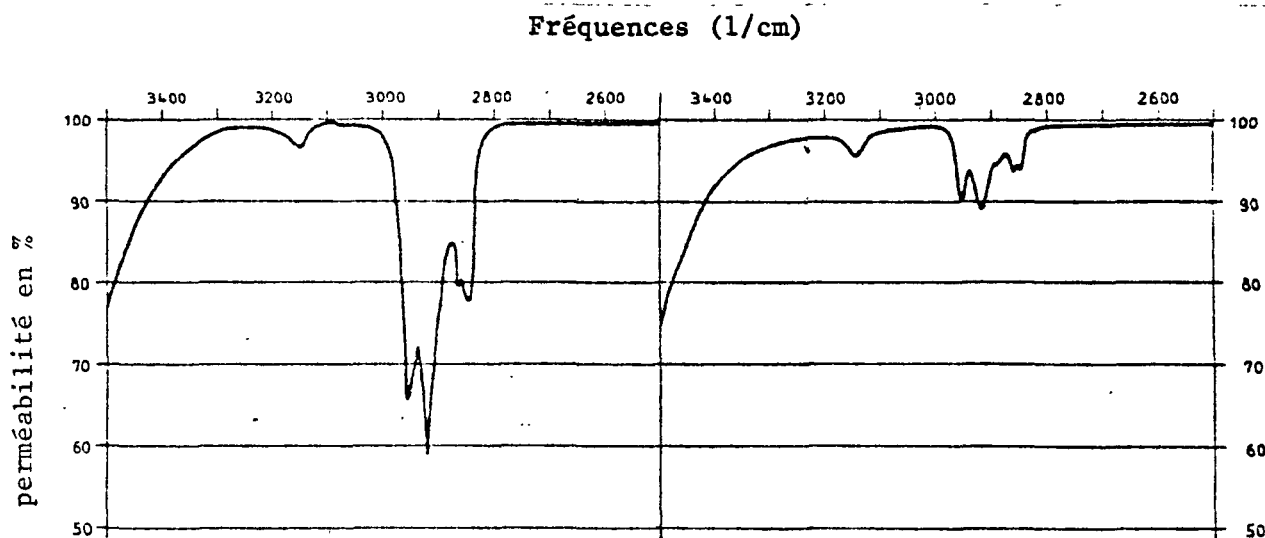


Fig. 4.52 : Cas Ravensburg. Spectrogramme infrarouge des absorptions d'hydrocarbures entre 3500 et 2500/cm ; 9 octobre 1979.

A gauche : piézomètre 103 avec 0,29 mg/l d'hydrocarbures. A droite : piézomètre 104 avec la charge fondamentale de 0,06 mg/l d'hydrocarbures. Epaisseur de la couche : 100 mm.

Avant le début des travaux de protection on a mesuré dans le puits de protection une couche d'huile épaisse d'environ 25 cm. Son diamètre était d'abord de 300 mm et sa profondeur de 10 m seulement. Il ne pouvait débiter que 1 l/s. La fig. 4.53 montre les quantités d'huile récupérées en fonction du temps. Cette représentation montre bien que le rendement fut grandement amélioré à partir de la mi-août 1979, où le puits, agrandi à 600 mm, fut exploité au débit de 4 l/s. La masse de 9,7 m³ de fuel, récupérée jusqu'au 31 décembre 1979 est à considérer comme étant un bon résultat.

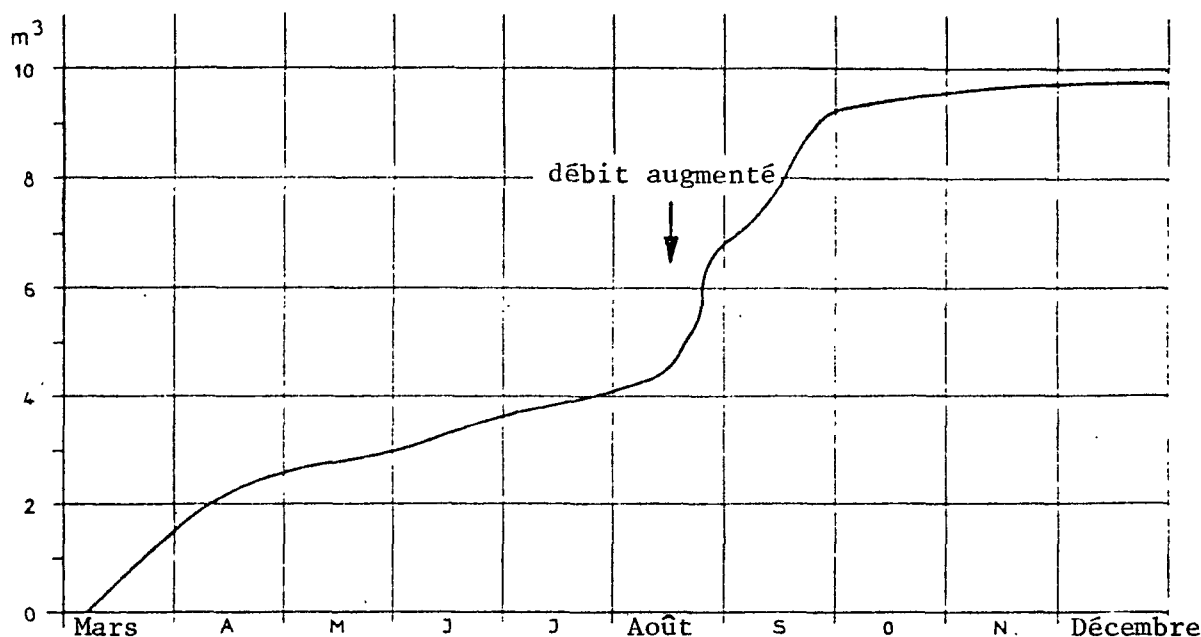
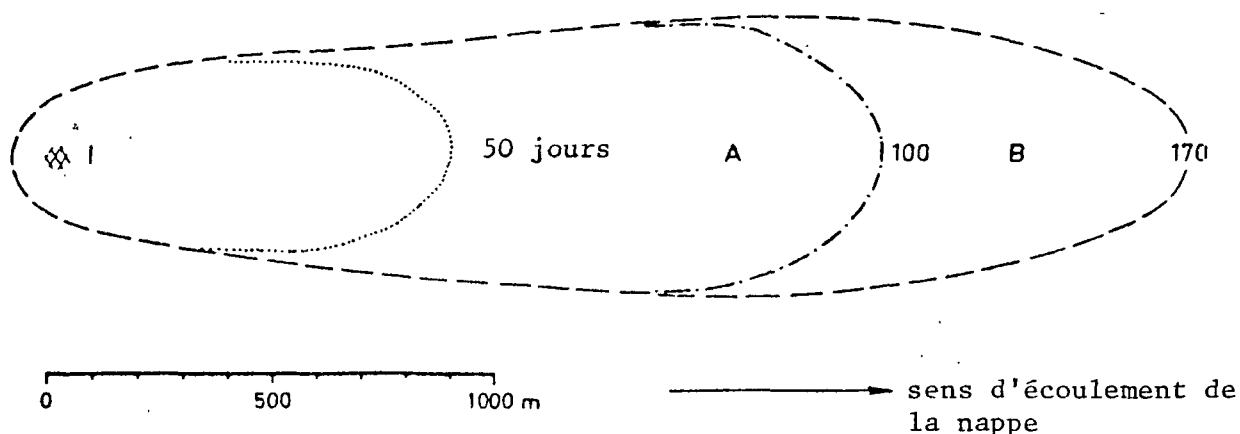


Fig. 4.53 : Cas Ravensburg. Volumes récupérés de fuel domestique

Cas 21 : Munich (terrasse de graviers de Munich)

A l'ouest de Munich, dans le domaine de la terrasse fluvioglaciale de Munich, environ 670 m³ d'essence tétraéthylénique à plomb se sont écoulés fin janvier 1940 et se sont infiltrés en totalité dans les graviers. De la sorte environ 2 t de tétraéthyl à plomb ont pénétré dans le sous-sol, resp. dans l'eau souterraine. Etant donné la grande vitesse d'écoulement de la nappe dans cette région (plusieurs mètres à quelques dizaines de mètres par jour) l'essence s'est très vite écoulée dans cette direction. La fig. 4.54 montre les étapes de l'extension après 50, 100 et 160-180 jours. L'extension a eu lieu sans doute à l'état de solution ; la présence de l'essence a été faite par analyse organoleptique.



La plus grande extension de la pollution de la nappe a été atteinte 10 mois après les pertes, environ 2,5 km. Dans la zone B on a constaté une baisse sensible de la pollution après environ 2 ans ; la composition de l'eau y était normale après 4 ans. Dans la zone A, de l'essence apparaissait encore dans quelques puits après 4 1/2 ans. Après 9 ans au plus tard, aucune pollution par essence ne fut plus décelée dans toute la région.

Au cours des deux premières années, du plomb ne fut décelé que sous des quantités inférieures à 0,4 mg/l. A partir de la 3e année, la plupart des échantillons ne renfermaient plus de plomb, tout au plus de façon isolée en quantités insignifiantes (0,02-0,1 mg/l).

Cas 22 : Feldkirchen (terrasse de graviers de Munich)

De l'huile a été découverte dans une ballastière draguée, éloignée d'environ 150 m d'un dépôt de réservoirs. Il s'agissait de distillats moyens qui, à la suite d'un défaut des réservoirs, se sont infiltrés dans le sous-sol en quantités non connues. Les pertes se situent à l'intérieur des graviers sableux pléistocènes (terrasse de graviers de Munich) très perméables ($k_f = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s). La surface de la nappe se situe vers environ 10 m, la base de l'aquifère (tertiaire récent) vers environ 22 m de profondeur (fig. 4.55). Tenant compte de la grande perméabilité de l'aquifère et de la grande extension de la flaque d'huile, on estima que l'aménagement de puits d'écopage n'était pas la bonne solution. On creusa plutôt le long de la ballastière un fossé jusqu'à la surface de la nappe, dans lequel on a pu récupérer en effet d'importantes quantités d'huile.

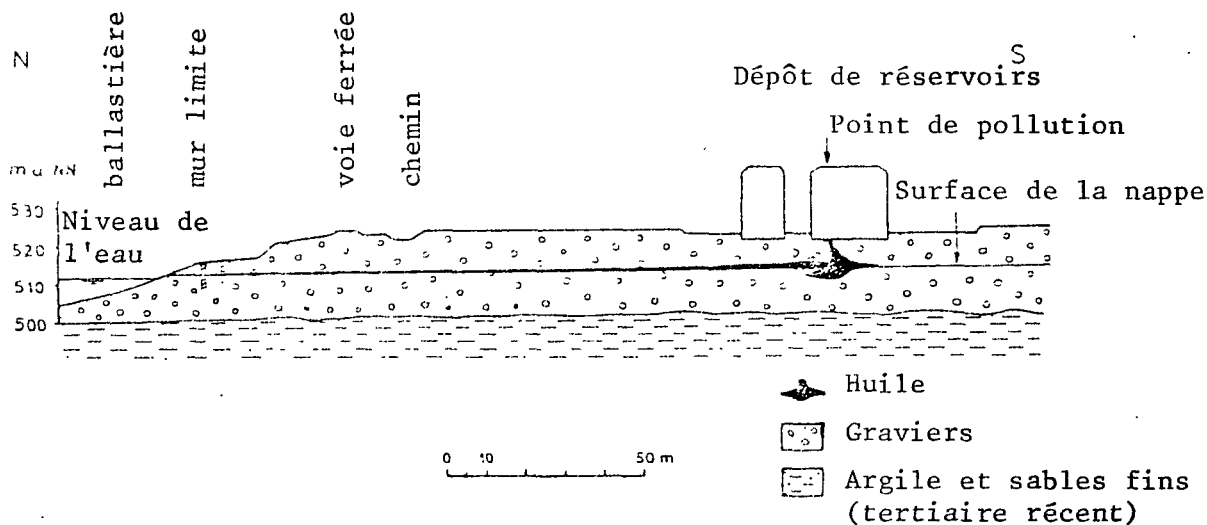


Fig. 4.45 : Cas Feldkirchen. Coupe géologique schématisée.

Après que les arrivées d'huile dans la ballastière avaient diminué, de nouvelles venues d'huile se manifestèrent environ 1 an plus tard en automne. Etant donné qu'aucun nouveau défaut n'avait été relevé dans le dépôt des réservoirs, on devait admettre que les nouvelles venues d'huile étaient une suite de modifications des niveaux de la nappe entraînant une mobilisation de l'huile. Pour prévenir toute menace future sur les baignades dans l'étang, on a édifié le long de l'étang un mur de protection en béton doublé d'un revêtement en acier et atteignant le plus bas niveau de la nappe (fig. 4.56). En principe, il aurait été possible de recueillir l'huile dans le lac même à l'aide d'un barrage. En raison de sa grande importance comme facteur sanitaire on devait éviter toute pollution par huile de l'eau. L'extension de l'huile a été surveillée à l'aide de piézomètres.

Cas 23 : Landau (Isar)

A la suite de la corrosion d'une conduite de retour enterrée d'un atelier, plus de 200 m³ de fuel EL se sont écoulés. Les pertes ne furent constatées que lorsque l'huile s'étalait à la surface de l'eau d'un étang éloigné de 60-70 m (fig. 4.57).

Dans la région des pertes affleurent des dépôts fluviatils de sables et graviers bien perméables, recouverts par places par une couche de limon. Pour améliorer la capacité portante des fondations, la couche de limon a été enlevée par places à l'emplacement des constructions et remplacée par des graviers et des sables. La surface de la nappe se rencontre déjà vers 1-2 m de profondeur. La nappe d'écoule en direction est à nord-est. A environ 1 km des pertes et dans la direction d'écoulement de la nappe se trouvent les puits d'alimentation de la ville de Landau, implantés dans le même aquifère.

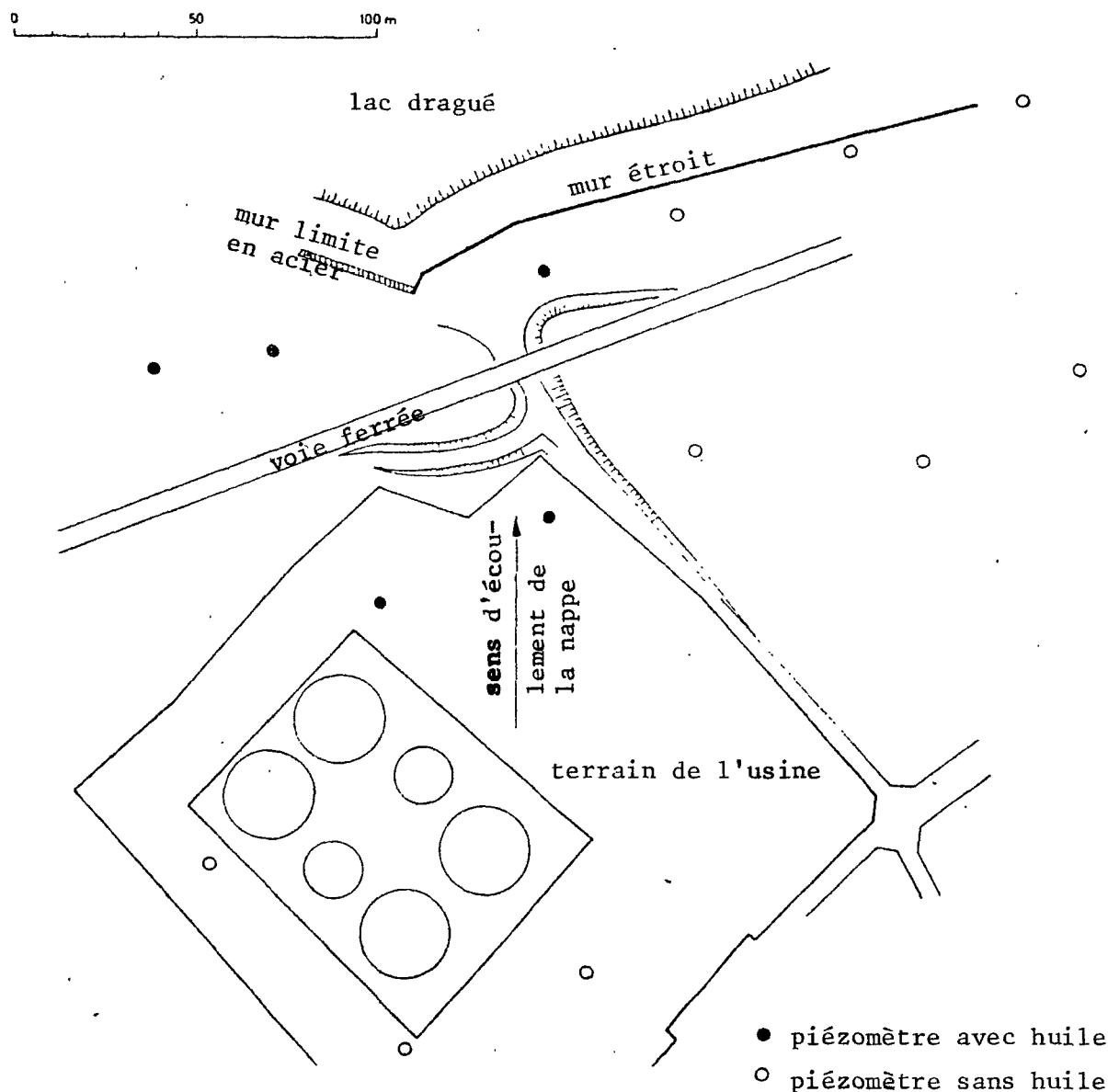


Fig. 4.56 : Cas Feldkirchen. Esquisse de situation.

A l'aide de terrassements et de forages, on a essayé de délimiter la flaque d'huile. Il apparaissait que la masse de l'huile avait été retenue à proximité des pertes. Il était surprenant que - contre toute attente - l'huile s'était étalée, très peu en direction du sens d'écoulement de la nappe, mais de préférence vers l'amont du courant de la nappe. Les recherches hydrogéologiques entreprises à la suite ont fourni une explication plausible. Ce sont les couches de limon plongeant en partie dans l'aquifère et les fondations de l'usine qui ont empêché l'extension de l'huile dans le sens d'écoulement de la nappe, tandis que ces obstacles manquaient dans la direction opposée, vers l'étang (fig. 4.58).

130 m³ d'huile ont pu être récupérés dans l'espace de 14 jours. Dans les piézomètres implantés à l'est des ateliers, seules des traces de composés d'huile ont été constatées. De la sorte, aucune pollution des puits de la ville de Landau n'était à craindre. Les mesures d'assainissement ont néanmoins occupé 2 1/2 ans jusqu'à l'arrêt de l'abaissement de la nappe. Cela occasionna des dépenses atteignant 130 000 DM. Ce cas confirme la nécessité d'attribuer une attention particulière aux conditions géologiques et aux constructions dans les environs des nappes phréatiques.

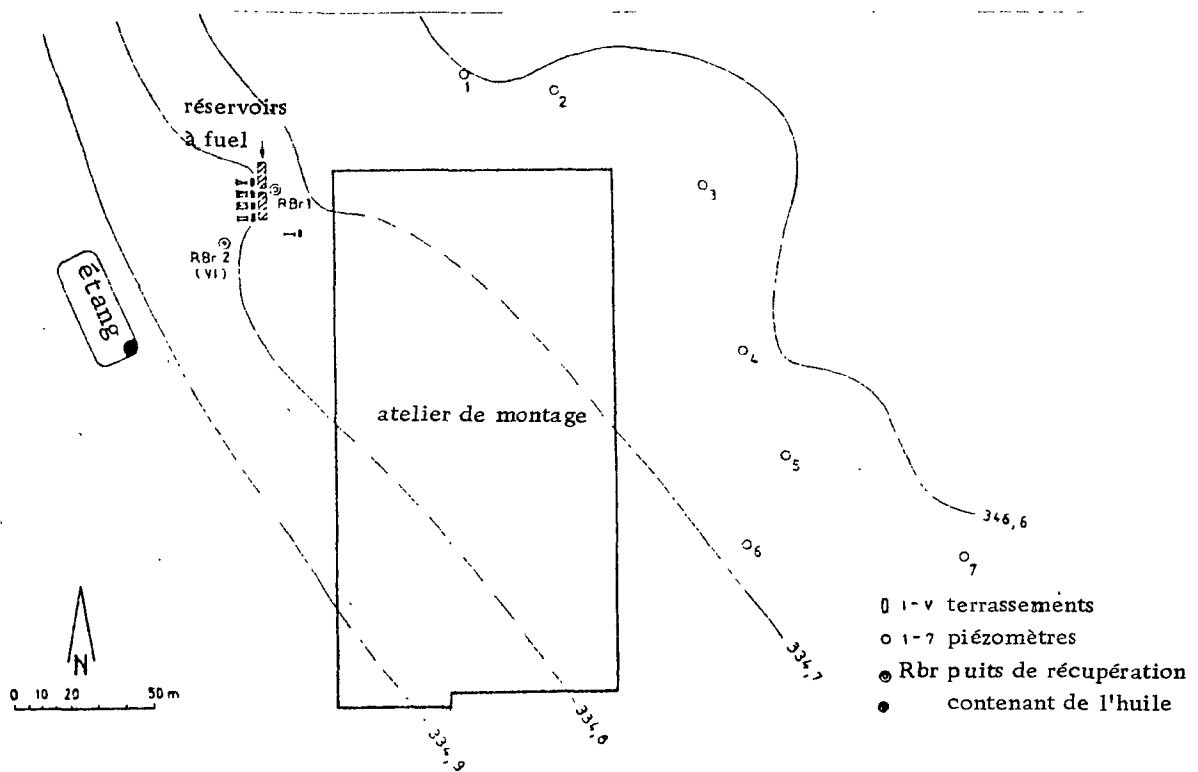


Fig. 4.57 : Cas Landau. Esquisse de situation.

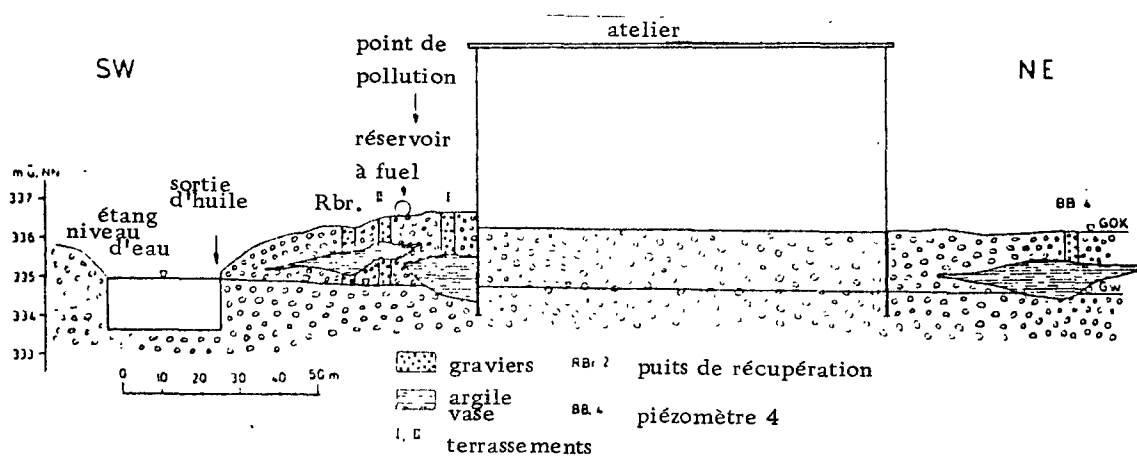


Fig. 4.58 : Cas Landau. Coupe géologique.

Cas 24 : Autoroute Munich-Garmisch

Lors de l'accident d'un camion-citerne, 6 m³ de fuel EL se sont infiltrés dans le sous-sol sur le bord de l'autoroute. On a d'abord enlevé environ 250 m³ de terre gorgée d'huile sur 2 m de profondeur et on les a remplacés par de la terre propre.

Quelques mois après l'accident, on a implanté un sondage carotté au centre de la flaque d'huile et on l'a poussé à 15 m de profondeur. Elle a donné une coupe géologique assez uniforme du sous-sol, à savoir du gravier moyen à grossier contenant une notable proportion de sables grossiers à moyen. Les courbes granulométriques (fig. 4.59), représentatives de dépôts fluvioglaciaires pléistocènes, permettent de fixer la conductivité hydraulique vers $1 \text{ à } 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Le sous-sol peut donc être qualifié de bonne perméabilité. La surface de l'aquifère se situe vers la profondeur d'environ 70 m.

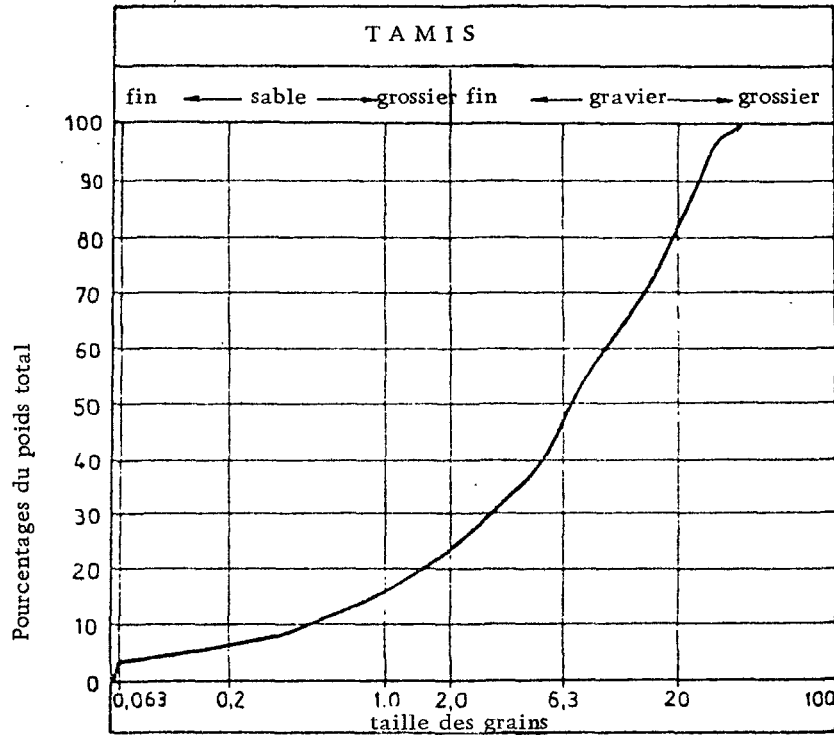


Fig. 4.59 : Cas autoroute Munich-Garmisch. Courbes cumulatives de la répartition des grains .

La fig. 4.60 représente la répartition de l'huile dans le sol. Jusqu'à environ 9 m de profondeur la teneur en huile du sol est près de 8 l/m³, de 9 à 12 m déjà très inférieure à 1 l/m³. En tenant compte de la surface d'infiltration de 10 à 15 m², on peut en conclure que le pouvoir de rétention du sol dans la zone déblayée dépasse largement la valeur type de 10 l/m³ en huile accidentée. Ceci ne peut se comprendre qu'en tenant compte de la proportion de grains fins.

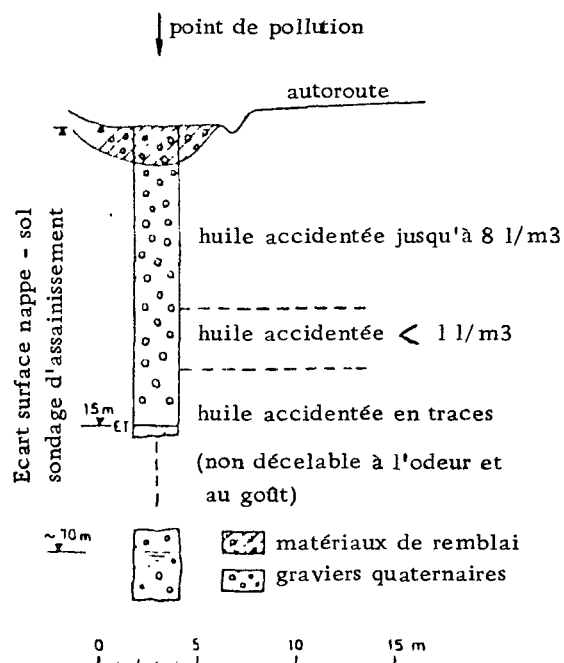


Fig. 4.60 : Cas autoroute Munich-Garmisch. Coupe du sondage et répartition de l'huile.

Cas 25 : Burghausen sur la Salzach

L'apparition d'odeurs d'huile dans les sources des bords de la vallée de la Salzach était une première indication de pertes de produits d'huile minérale dans l'enceinte d'une raffinerie éloignée d'environ 1,6 km (fig. 4.61). Dans des tranchées bétonnées mal construites se perdaient chaque jour 50 m³ d'eau avec une teneur de 1,5 à 5 m³ d'huile séparable. L'infiltration s'était poursuivie durant environ 16 mois ; on peut estimer que plus de 1400 m³ d'huile ont pénétré dans le sous-sol. La teneur de l'eau en composés solubles d'huile est particulièrement élevée car le mélange d'hydrocarbures produit dans l'usine de craquage contient une forte proportion de benzène et toluène, aromates très solubles.

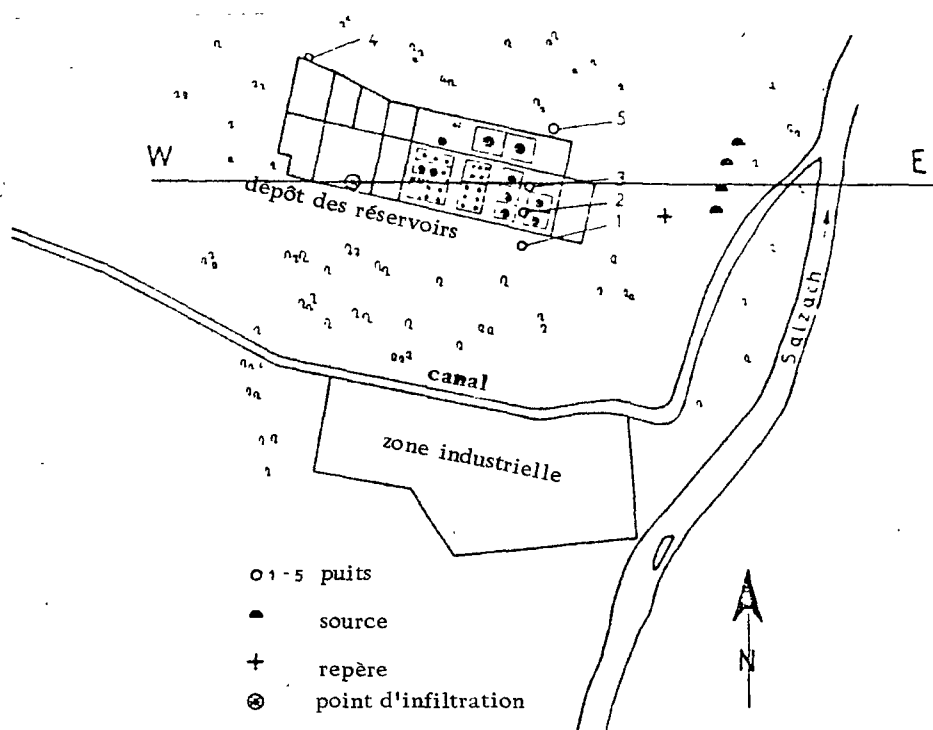


Fig. 4.61 : Cas Burghausen. Esquisse de situation.

La fig. 4.62 donne une vue d'ensemble des conditions hydrogéologiques. La zone polluée est située dans un épandage de graviers fluvioglaciaires, épais de 50 m. La perméabilité de ces graviers sableux pléistocènes est très élevée. De même, les sables et graviers siliceux d'âge tertiaire récent, (molasse d'eau douce supérieure) ont aussi une bonne perméabilité. L'ensemble des couches ne contient que de faibles intercalations de vases sableuses et peut donc être considéré au point de vue hydrogéologique comme une masse homogène. La surface de la nappe est située à la profondeur de 46 m dans le terrain de la raffinerie. De telles épaisseurs de terrain non saturé sont rares. Les sources des bords de la Salzach représentent les émergences d'une partie de la nappe passant sous la raffinerie.

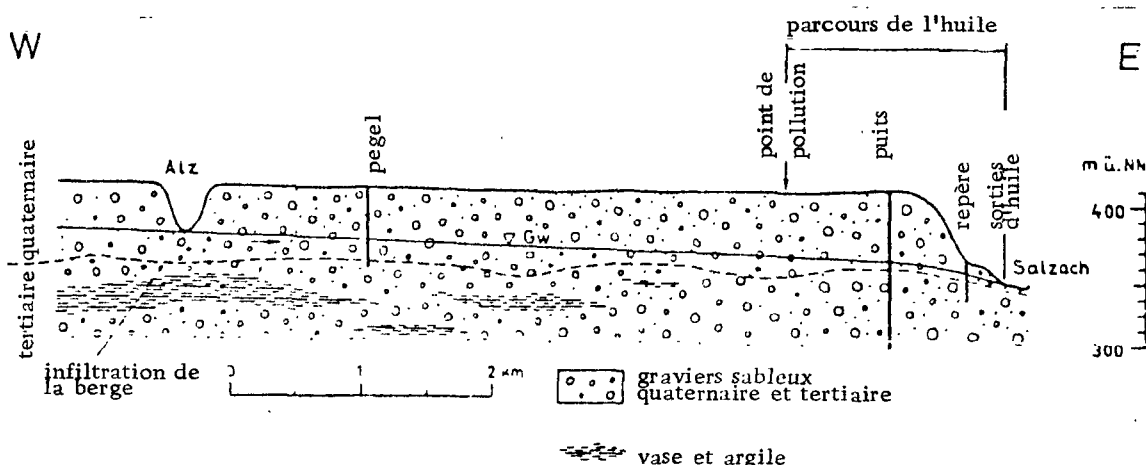


Fig. 4.62 : Cas Burghausen. Coupe hydrogéologique.

Les premiers indices de pollution décelables à l'odeur ont été constatés dans ces sources un an après la mise en service de l'usine de craquage ; une demi-année plus tard apparaissait de l'huile séparable pour la 1^{re} fois. Vers cette époque, les défauts constatés avaient aussi été réparés. Pour diverses raisons, on a renoncé à récupérer l'huile par puits. On espérait que la pollution disparaîtrait d'elle-même. Une des raisons décisives faisant renoncer à la construction de puits de protection était qu'aucune pollution n'était apparue dans les puits en service, placés à 100 m de distance sur une ligne transversale entre les pertes et les sources. Ce fait ne devrait s'expliquer que par la présence d'étroites langues d'huile, liées à des chenaux à perméabilité préférentielle dans le sous-sol.

En négligeant la durée d'infiltration du liquide huileux, la première apparition des odeurs dans les sources permet de calculer la vitesse d'écoulement de la nappe et de l'estimer à environ 4,5 m/d, une valeur concordant bien avec les conditions hydrogéologiques. La phase huile n'arriva aux sources qu'avec 5 mois de retard. La fig. 4.63 représente l'évolution des arrivées d'huile dans les 4 sources, échelonnées sur 165 m en travers du sens d'écoulement de la nappe. Il faut remarquer l'accroissement rapide des venues d'huile et leur diminution relativement lente (comparer le débit total). Au total, 56 m³ d'huile ont été recueillies en 2 ans dans les sources à l'aide de séparateurs d'huile.

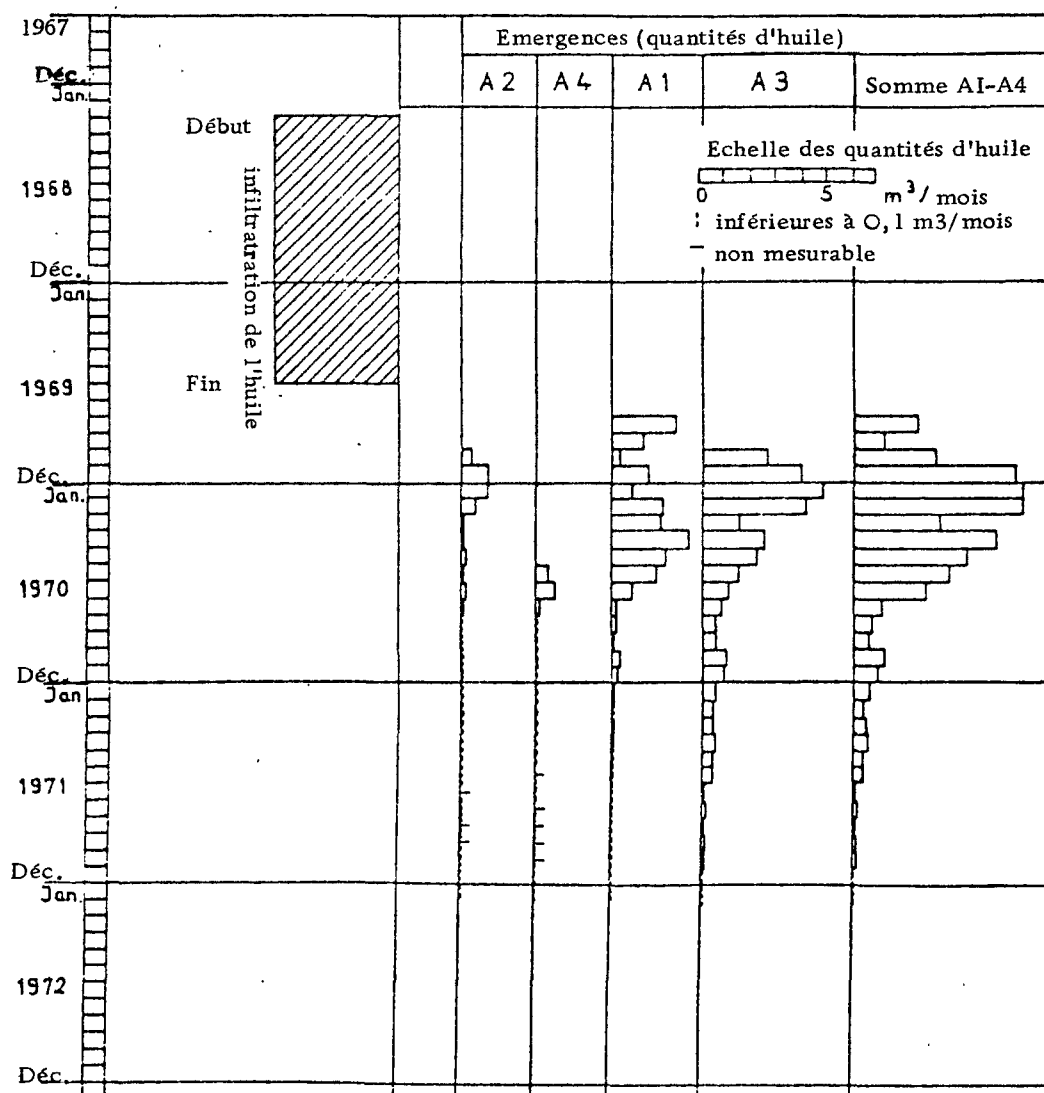


Fig. 4.63 : Cas Burghausen. Evolution dans le temps du débit d'huile des sources.

En admettant que pas plus de 100 m³ d'huile n'ont été retenus dans la zone d'infiltration, il a dû se former à la surface de la nappe de longues flaques d'huile totalisant environ 1 250 m³ d'huile. Si on donne à ces flaques d'huile une forme de triangle de base, 165 m, on obtient une surface de 130 000 m². Ce qui donne une épaisseur d'huile de 9-10 l/m². Cette valeur correspond bien aux valeurs types de sols ayant une perméabilité de $k_f = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Le biologiste notera avec intérêt que des pellicules biologiques se sont formées dans les sources aux venues d'huile ; celles-ci faisant défaut dans les sources non polluées.

Cas 26 : Coblenze (vallée du Rhin moyen)

A l'occasion d'un contrôle de routine des piézomètres d'une usine de métaux le 16.5.1974, on a trouvé de l'huile à la surface de la nappe dans un des tuteurs. La direction de l'usine a alors fait implanter un forage (B 1) à proximité immédiate de ce tuyau. Le sous-sol était imprégné d'huile immédiatement au-dessus de la nappe. Etant donné la crainte que la pollution avait déjà pris une plus grande extension a rapidement foré B2-B6. B2 était sans huile. B3 était moyennement imprégné d'huile dans la zone de la surface de la nappe. B4 était plus fortement imprégné d'huile. B5 et B6 étaient à nouveau sans huile ; même l'eau prélevée ne sentait pas l'huile (fig. 4.64).

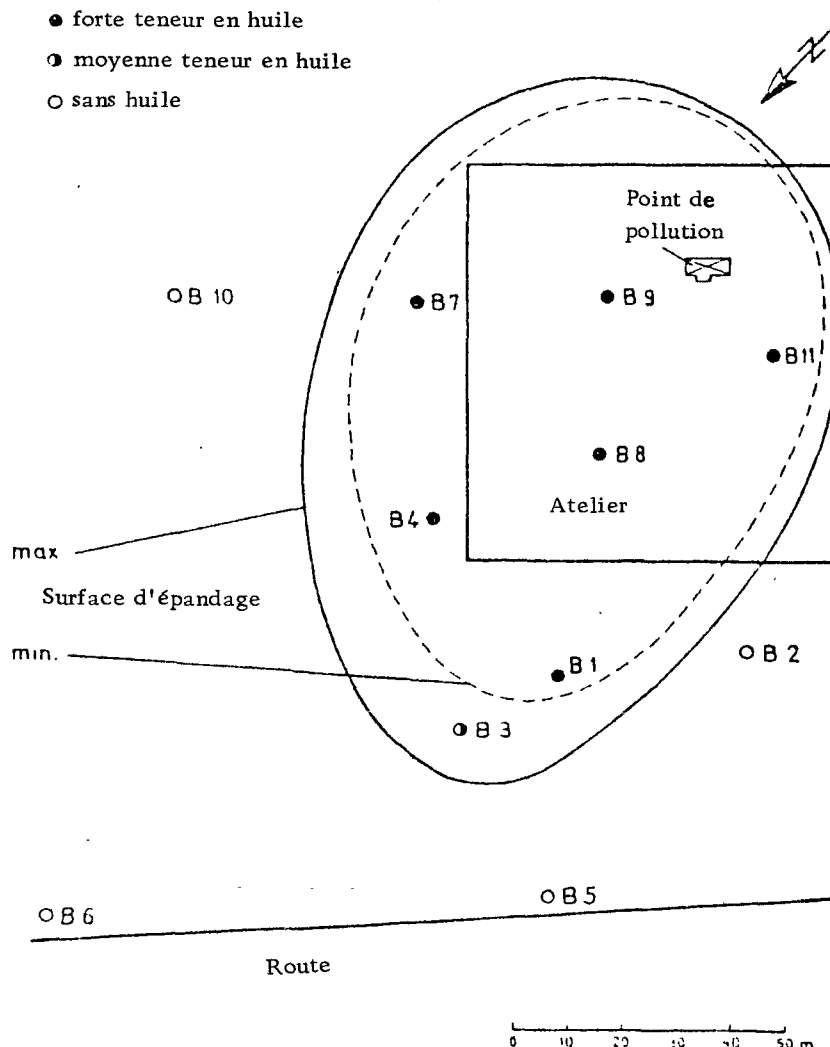


Fig. 4.64 : Cas Coblenze. Plan de situation.

Le foyer de pollution devait être cherché à l'intérieur même du terrain industriel. Etant donné que des analyses par chromatographie gazeuse d'échantillons d'huile des forages et des graisses consistantes utilisées dans l'usine, exécutées plus tard, ont montré des résultats pratiquement identiques, il n'était pas difficile d'orienter les travaux de protection. En admettant que B1, B3 et B4 avaient touché la langue d'une flaque d'huile s'étalant dans le sens d'écoulement de la nappe, le foyer de la pollution devait être cherché au sud de ces forages. Là se trouve un récipient recueillant l'huile de graissage en circulation. On supposa que ce récipient n'était pas étanche. On implanta B8 à B11, B10 excepté, de façon à saisir sûrement une lentille d'huile ayant ce réservoir comme point d'infiltration. Le choix des points d'implantation dépendait des difficultés de situation de l'atelier. B10 seul fut intentionnellement implanté en dehors de la zone des pertes, ceci pour délimiter la lentille d'huile en cette direction. Le résultat des sondages confirma les suppositions. Ainsi, les pertes étaient bien localisées. Lors de la vérification de ce réservoir à graisse consistante on a trouvé des fentes dans le fond bétonné permettant les fuites d'huile. Les travaux d'assainissement pouvaient alors être conduits systématiquement.

L'atelier est situé dans le domaine de la basse terrasse rhénane dont l'épaisseur peut atteindre 20 m. La surface de la nappe se trouve vers 9-13 m. La conductivité hydraulique des dépôts sablo-graveleux se place entre 1.10^{-3} et 1.10^{-2} m/s. Dans la fig. 4.64, on a cherché à délimiter l'extension de la lentille d'huile. Le trait plein correspond sensiblement au maximum, le trait interrompu au minimum de l'extension. La zone à phase d'huile est estimée à environ 8000 m². A l'aide de cette délimitation et des résultats expérimentaux connus, on peut faire une estimation approchée de la quantité d'huile perdue. La quantité totale d'huile infiltrée devrait se situer entre 40 et 80 m³. Une zone à huile dissoute n'a pas été mise en évidence. Apparemment l'huile se trouvait encore dans le stade d'expansion.

Il n'était pas possible - en raison des conditions de l'usine - d'envisager l'enlèvement du sous-sol imprégné d'huile. La seule mesure sensée était la récupération de l'huile mobile surnageant la nappe au moyen de puits. Cette solution fut exécutée sans retard. En raison de leur position favorable, de leur profondeur et de leurs travaux filtrants suffisants, les forages B7, B8, B9 et B11 pouvaient être utilisés de suite comme puits d'assainissement. A partir du 11.8.1974 on enleva de ce puits un total de 16 m³/h. Le débit était assez uniformément réparti sur les différents puits. On écopait l'huile aux endroits où il y en avait en assez grande quantité sur la surface de la nappe. Le mélange eau-huile fut déversé dans un séparateur et l'eau vers la canalisation.

Le niveau de la nappe baissant continuellement, les travaux de récupération étaient productifs jusqu'au 20.9.1974. 12 m³ d'huile en tout ont été retrouvés. Ensuite, la nappe se releva de façon continue ; l'huile mobile était poussée vers le haut et ainsi empêchée de s'écouler vers les puits. A partir du 1.10.1974, on ne pouvait plus récupérer de l'huile séparable (fig. 4.65) 12 mois plus tard seulement, lorsque la nappe avait retrouvé ses bas niveaux, de faibles quantités d'huile pouvaient à nouveau être récupérées. Il apparaissait que le fort relèvement de la nappe durant le dernier trimestre 1974 avait entraîné une importante fixation de l'huile comme huile résiduelle (fig. 4.66).

Pour éviter l'extension de particules dissoutes d'huile, l'usine a plus tard déplacé ses prises d'eau dans la zone des infiltrations ; ainsi la phase d'huile est placée dans l'entonnoir de dépression de ce puits. Ainsi, le danger d'une extension ultérieure de particules dissoutes d'huile fut définitivement écarté.

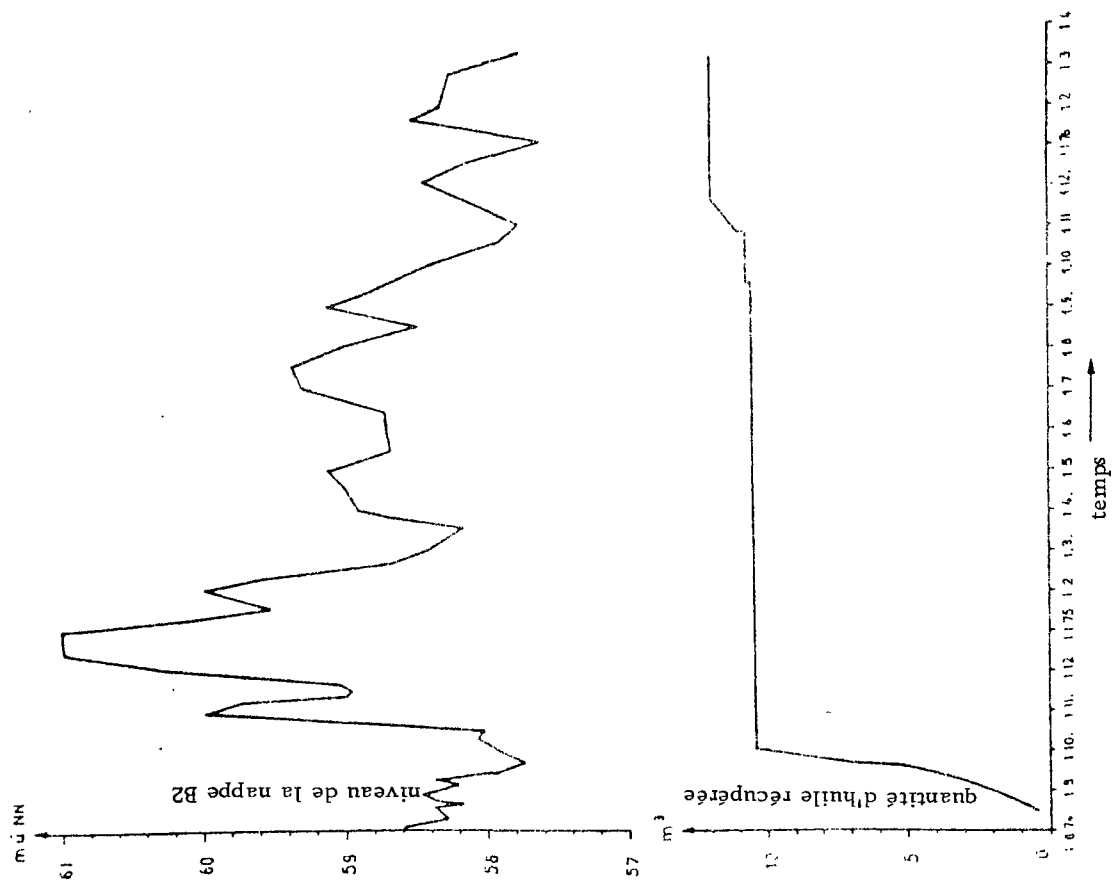


Fig. 4.66 : Cas Coblenz. Relation entre la position de la nappe et la quantité totale d'huile récupérée.

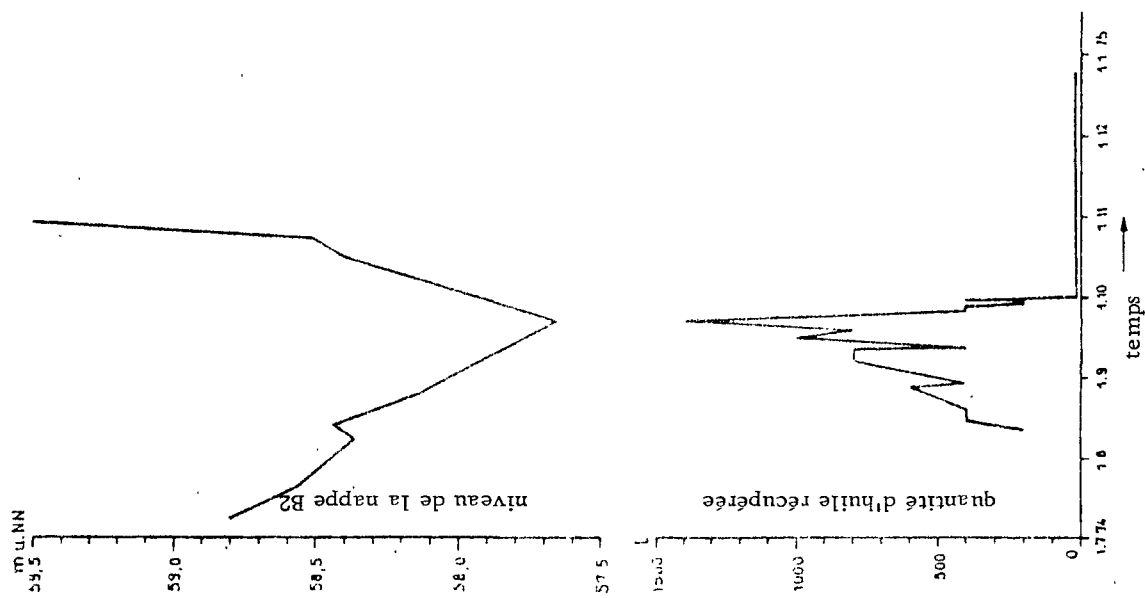


Fig. 4.65 : Cas Coblenz. Relation entre la position de la nappe et la récupération de l'huile.

Cas 27 : Remagen (vallée du Rhin moyen)

Durant le long et froid hiver 1962/1963 s'est produit un accident au cours duquel un camion-citerne a descendu la rampe de la route ; environ 10 m³ de fuel léger se sont écoulés. L'huile ne s'est pas infiltré directement sur place ; elle s'est répandue dans le sillon d'un champ recouvert de neige et s'y est infiltré au cours d'un jour en laissant des restes insignifiants. Les conditions géolohydrologiques étaient claires ; sous une couverture de 2 à 3 m de limon de débordement loessique se trouvent des graviers sableux de la terrasse rhénane. Le niveau de la nappe se situait vers 9 m de profondeur.

L'infiltration rapide de l'huile dans un sol gelé jusqu'à la profondeur de 0,80 m tellement fort qu'il ne pouvait être creusé qu'au marteau-pilon était surprenante. L'huile avait traversé la couche de limon sans y laisser des traces notables. A l'affleurement on y trouva relativement peu de tubes de vers et de racines, ayant l'épaisseur d'une aiguille à tricoter à celle d'un crayon. Leurs parois n'étaient pas revêtues d'eau ni de glace ; par endroits seulement se trouvaient des cristaux de glace qui ne bouchaient pourtant pas complètement la section des tubes. Après quelques semaines, le sol était dégelé et la pluie avait lavé les parois de l'affleurement ; on pouvait alors y reconnaître une masse assez serrée de tubulures allant par places jusqu'à la base des limons. Cette densité de tubulures devait être la raison de cette perméabilité exceptionnelle. Une enquête permit de préciser que le champ était autrefois occupé par une pépinière.

Cas 28 : Netphen (Sieg)

Le mauvais fonctionnement d'une vanne dans le système de transmission de l'huile entraîna le débordement de 2 réservoirs enterrés ; au moins 10 m³ de fuel EL se perdaient au cours d'une nuit. Les dégâts furent déjà découverts le matin suivant. Un danger imminent de pollution par huile existait ainsi pour la station de pompage de Siegen, éloignée au plus de 750 m. Des mesures de protection furent prises de suite. Leur forme et leur déroulement étaient liés à la situation hydrogéologique (fig. 4.67).

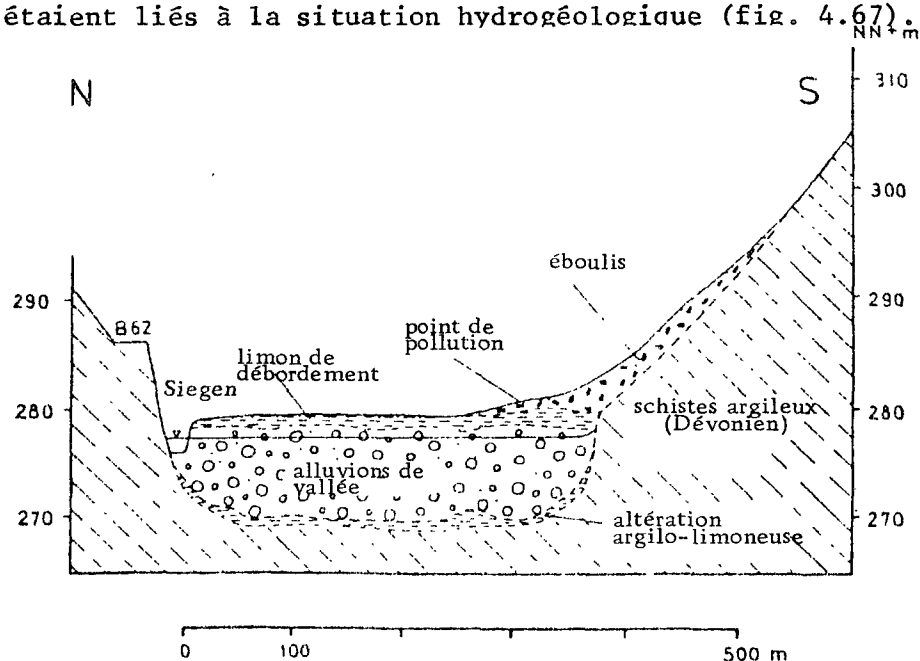


Fig. 4.67 ; Cas Netphen. Coupe géologique schématisée.

L'eau souterraine s'écoule sensiblement en direction de la vallée dans les dépôts pléistocènes récents, épais de 5,0 à 7,5 m, de la Sieg, recouverts d'une couche de limon de débordement, épaisse de près de 1,0 m. Les alluvions se composent de galets mal triés (graviers, pierres), en partie mélangés à du sable vaseux, en partie sans sable. La granulométrie varie vite et donc aussi la perméabilité en direction verticale et horizontale. A première vue, le dépôt d'alluvions paraît homogène ; un examen plus approfondi en montre l'hétérogénéité. Le limon de débordement est un sable vaseux.

La profondeur de la surface de la nappe est en moyenne de 2 à 3 m ; la vitesse d'écoulement de la nappe est estimée à plusieurs mètres par jour.

A l'aide d'une pelleteuse, on enleva d'abord le terrain voisin du réservoir jusqu'à la surface de la nappe. Une mesure complémentaire fut le creusement à une distance de 160 m vers l'aval et perpendiculairement à la direction d'écoulement de la nappe d'une tranchée-piège, longue de 120 m et creusé jusqu'à 0,80 m sous le niveau de la nappe. L'eau était d'abord sans eau ; conformément à l'attente, l'eau n'avait pas encore atteint le fossé-piège. De l'huile n'y apparaissait qu'au bout de quelques jours seulement. 6 sondages confirmèrent l'idée de la répartition de l'huile sur la nappe (fig. 4.68). L'eau souterraine a été nommée dans le fossé et dans un puits au voisinage des pertes durant plusieurs mois, jusqu'à ce qu'elle était sans huile. De la sorte la pollution était considérée comme réparée ; les mesures d'assainissement furent arrêtées.

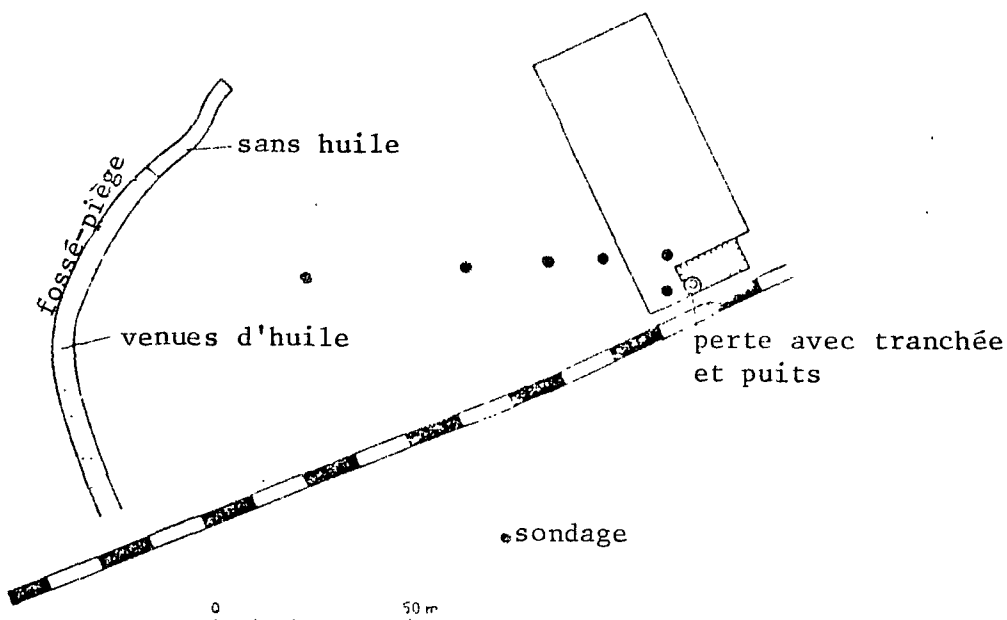


Fig. 4.68 : Cas Netphen. Position des tranchées et des sondages

Quatre ans après l'apparition de la pollution, on a été surpris de découvrir de l'huile dans un piézomètre situé 250 m vers l'aval du courant de la nappe. On a creusé de nouveaux fossés-pièges et on les a mis en service. Deux ans plus tard, au cours d'un printemps humide, avec des positions exceptionnellement hautes de la nappe, s'est produite une nouvelle arrivée d'huile. La relation entre les extensions tardives d'huile et les niveaux élevés de la nappe était claire. Il faut en conclure qu'au cours des niveaux normaux de l'eau de la première année de pollution, l'huile s'est accumulée au contact des graviers perméables et des sables vaseux peu perméables ou qu'elle a été retenue dans les couches à granulométrie fine. La remontée de la nappe vers des niveaux plus élevés ayant une plus grande perméabilité rendait possible une nouvelle mobilisation.

Ce cas montre combien il est nécessaire qu'après un assainissement en apparence couronné de succès, de continuer à surveiller la zone polluée. Il faut attendre les positions extrêmes de la nappe et maintenir les mesures de protection en état de fonctionnement. Dans le cas présent, la zone polluée et les mesures d'assainissement ont été doublées parce que la surveillance a été trop vite arrêtée.

Cas 29 : Bad Munstereifel (Eifel)

De l'huile minérale fut constatée dans l'Erft ; elle provenait vraisemblablement d'un égoût débouchant dans l'Erft. En barrant le canal et en creusant des tranchées dans la plaine alluviale jusqu'à 1 m de profondeur, on réussit à récupérer près de 7,5 m de fuel EL en l'espace de 2 mois.

Les conditions géologiques sont typiques pour de nombreux espaces construits dans le massif schisteux rhénan. La vallée est creusée dans les couches plissées du Dévonien inférieur. Ici ce sont des schistes sableux, avec intercalations de quelques bancs de grès et de grauwackes. Dans l'ensemble, ces couches sont très peu perméables à l'eau. La roche solide est couverte par un manteau d'éboulis de pente, produits d'altération pierreux sableux et vaseux des schistes et des grauwackes. Les éboulis étant bien perméables, l'eau des précipitations s'infiltre jusqu'au contact de la roche solide et s'écoule ensuite le long de la pente vers la vallée. C'est seulement dans la plaine alluviale que se forme une nappe aquifère continue, en relation avec l'Erft (fig. 4.69).

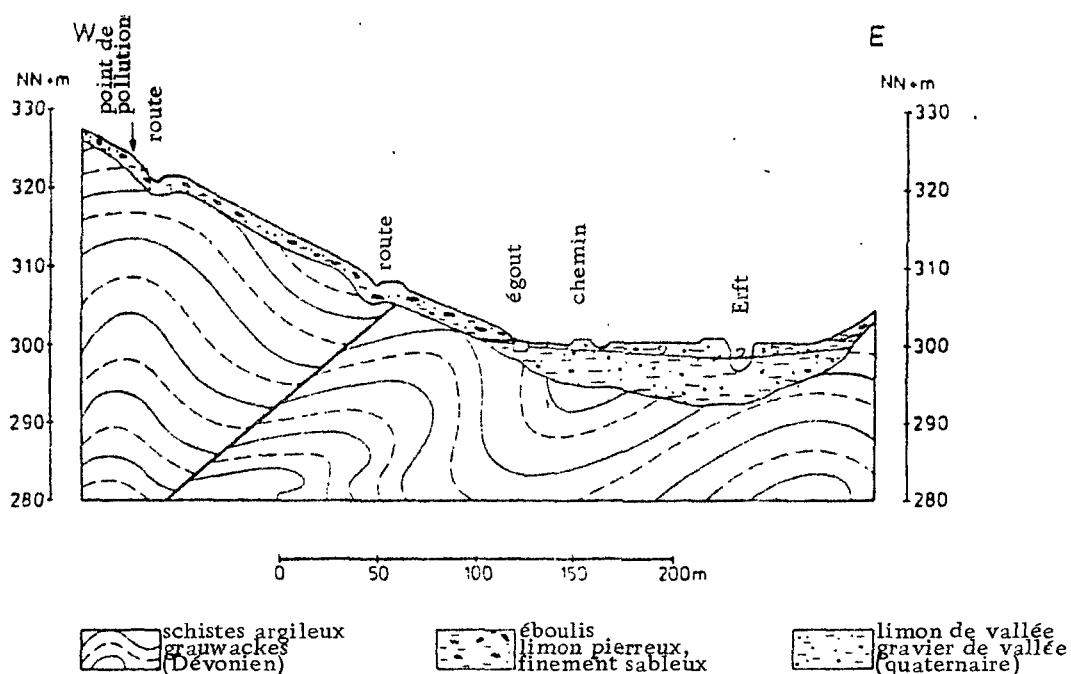


Fig. 4.69 : Cas Bad Munstereifel. Conditions géologiques.

L'huile devait avoir pris le même chemin ; la cause devait donc être cherchée vers l'amont de la pente. Un examen des réservoirs n'ayant pas donné de résultat, la pente s'élevant derrière les venues d'huile fut explorée systématiquement avec des sondes à mains et des sondes mécaniques jusqu'à 2,5 resp. 4 m de profondeur. L'air des forages fut analysé avec des tubes tests d'hydrocarbures. De la sorte on a pu délimiter assez bien les voies d'écoulement de l'huile et localiser les pertes (fig. 4.70).

La figure permet de voir que la zone d'huile est très étroite dans la zone des éboulis, ce qui doit être attribué à la grande perméabilité de ces matériaux. Ce n'est que dans le domaine de la surface de la nappe que l'on constate une extension latérale notable de l'huile.

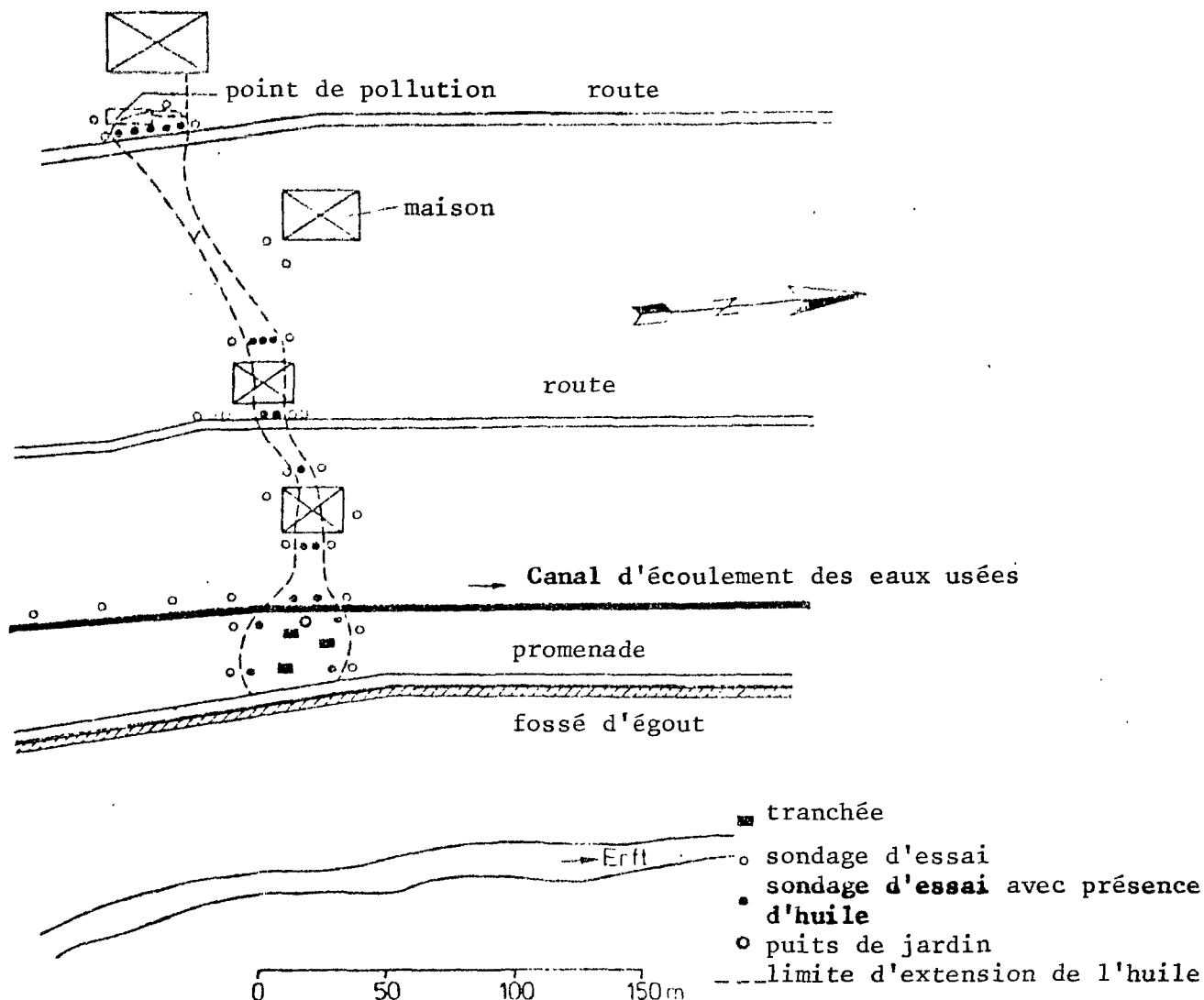


Fig. 4.70 : Cas Bad Munstereifel. Voies d'écoulement de l'huile

Cas 30 : Cologne-Niehl (Rhin inférieur)

Lors du remplissage d'un gros réservoir, environ 170 m³ de Super ont débordé, se sont étalés sur une surface de près de 800 m² de cour et se sont infiltrés dans le sous-sol en quelques heures. Les travaux de recherche ont débuté sans délai. D'abord on a exploré la surface d'infiltration jusqu'à la profondeur de 4,5 m avec 6 sondages à main, pour avoir une idée de l'extension de la masse imprégnée. Ensuite, on a creusé un puits d'écopage (I) au centre de l'infiltration et 3 piézomètres (II, III et IV) à des distances de 70 à 90 m (fig. 4.73).

La zone de pollution se situe dans le domaine de la basse terrasse rhénane d'âge pléistocène récent (graviers sableux dominants). Elle est couverte par des dépôts de crue holocènes (ici surtout des sables moyens). La fig. 4.71 donne la granulométrie du puits de protection (I). La surface de la nappe se situe en fonction du niveau d'eau du Rhin, éloigné d'environ 150 m, vers 8-10 m de profondeur. Sous l'effet de prises d'eau éloignées, l'eau souterraine s'écoule surtout vers les bords, donc en s'éloignant du Rhin.

L'extension de la phase huile à la surface de la nappe n'a pas pu être précisée davantage. Mais l'essence n'avait pas atteint les piézomètres II, III et IV après plus d'une demi-année. Des produits dissous ont seulement été trouvés à l'état de traces dans les tubes II et III. Au total, on a pompé dans le puits de protection (I) 85 000 m³ d'eau et ainsi récupéré environ 10 m³ d'essence en 19 mois. Cette quantité récupérée est très minime, car des estimations superficielles évaluent les quantités infiltrées à un total de 150 m³.

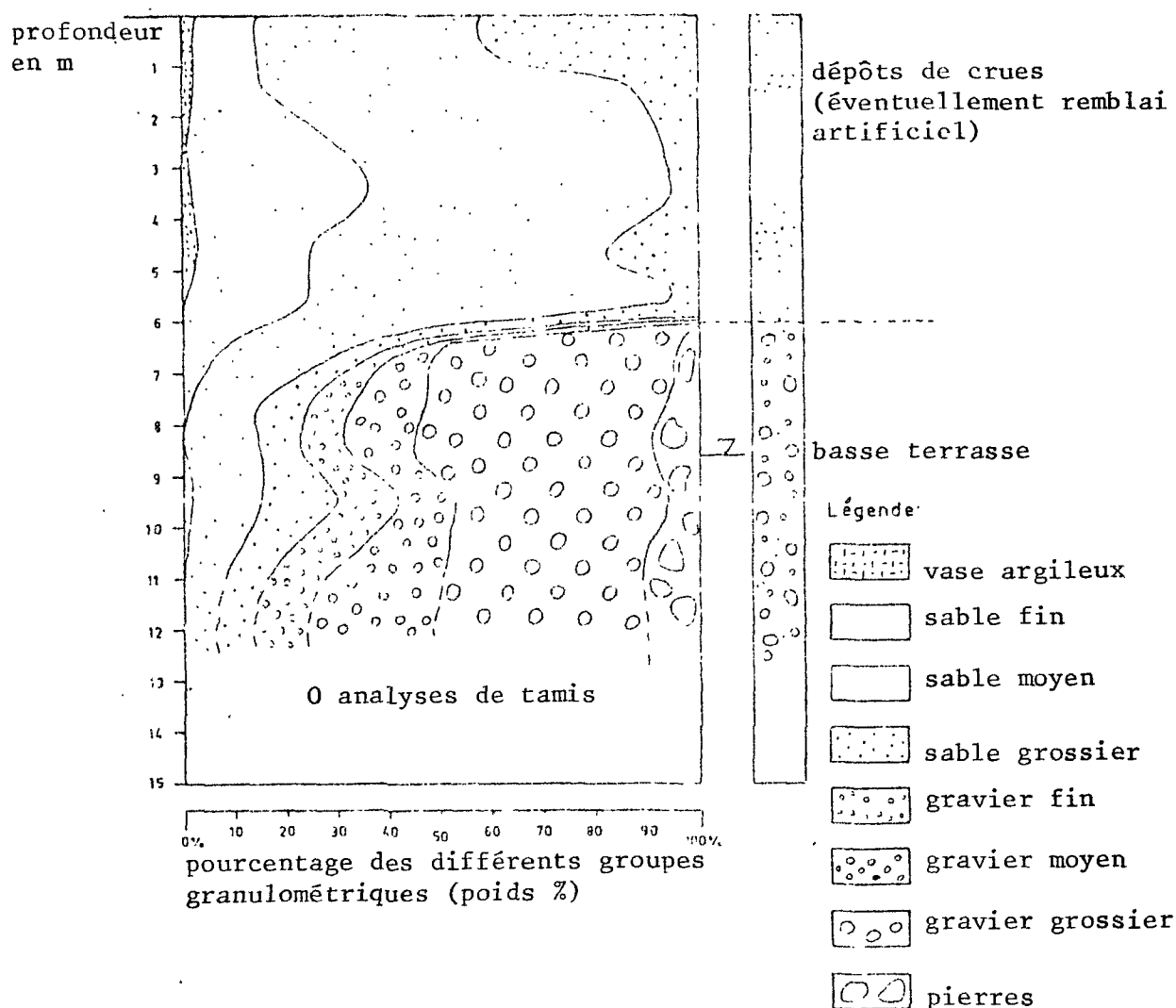


Fig. 4.71 : Cas Cologne-Niehl. Granulométrie forage I (puits de protection)

Pour reconnaître l'extension des hydrocarbures gazeux, on a fait des analyses d'air interstitiel. Les trous de forage furent creusés avec des sondes forcées. L'air interstitiel fut aspiré tous les mètres avec des tubes test ; la teneur en hydrocarbures était établie pour la moitié de la quantité grâce à la coloration de la substance d'essai. Les premières recherches furent faites 9 mois après l'apparition de la pollution (fig. 4.72). La partie supérieure du profil montre que les plus fortes teneurs en hydrocarbures se trouvent au voisinage immédiat de l'infiltration, c'est-à-dire à proximité de la masse d'huile. En examinant les valeurs des mesures, on constate un accroissement des hydrocarbures de haut en bas ; les valeurs les plus élevées se trouvent toujours juste au-dessus du bord capillaire.

Les mesures répétées 12 mois plus tard (profil du milieu) n'ont pas permis de reconnaître un changement essentiel dans la distribution des hydrocarbures. La phase gazeuse s'était même en partie un peu rétrécie ; elle était arrivée au repos. Il faut souligner que la phase gazeuse avait une extension sensiblement supérieure à celle de la flaque d'huile (non représentée sur le profil) sur la surface de la nappe. Enfin, 13 1/2 années plus tard, on refait des mesures dans le dépôt de réservoirs, fortement modifié par des constructions, qui montrent une forte régression de la concentration en gaz (partie inférieure du profil). La surface d'extension de la phase gazeuse au niveau du bord capillaire est représentée sur la fig. 4.73. Les limites ovoïdes des zones de concentration sont remarquables. Vraisemblablement, l'extension s'est étalée de préférence vers les bords de la terrasse. Il n'a pas été possible d'établir si ce fait était la suite de l'étalement de la flaque d'huile dans le même sens ou la conséquence des structures hétérogènes de la zone non saturée.

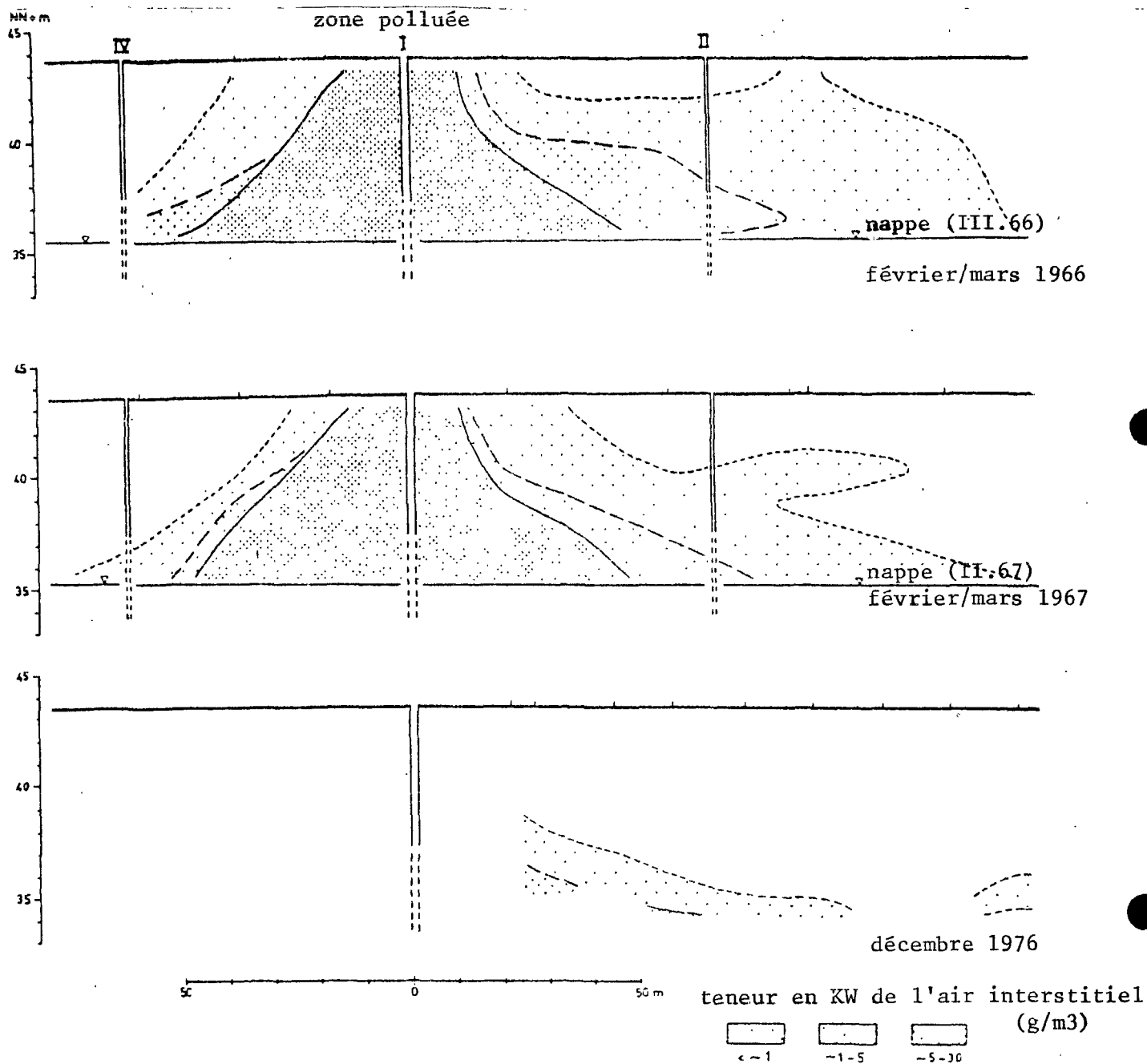


Fig. 4.72 : Cas Cologne-Niehl. Coupes à travers la zone à phase gazeuse.

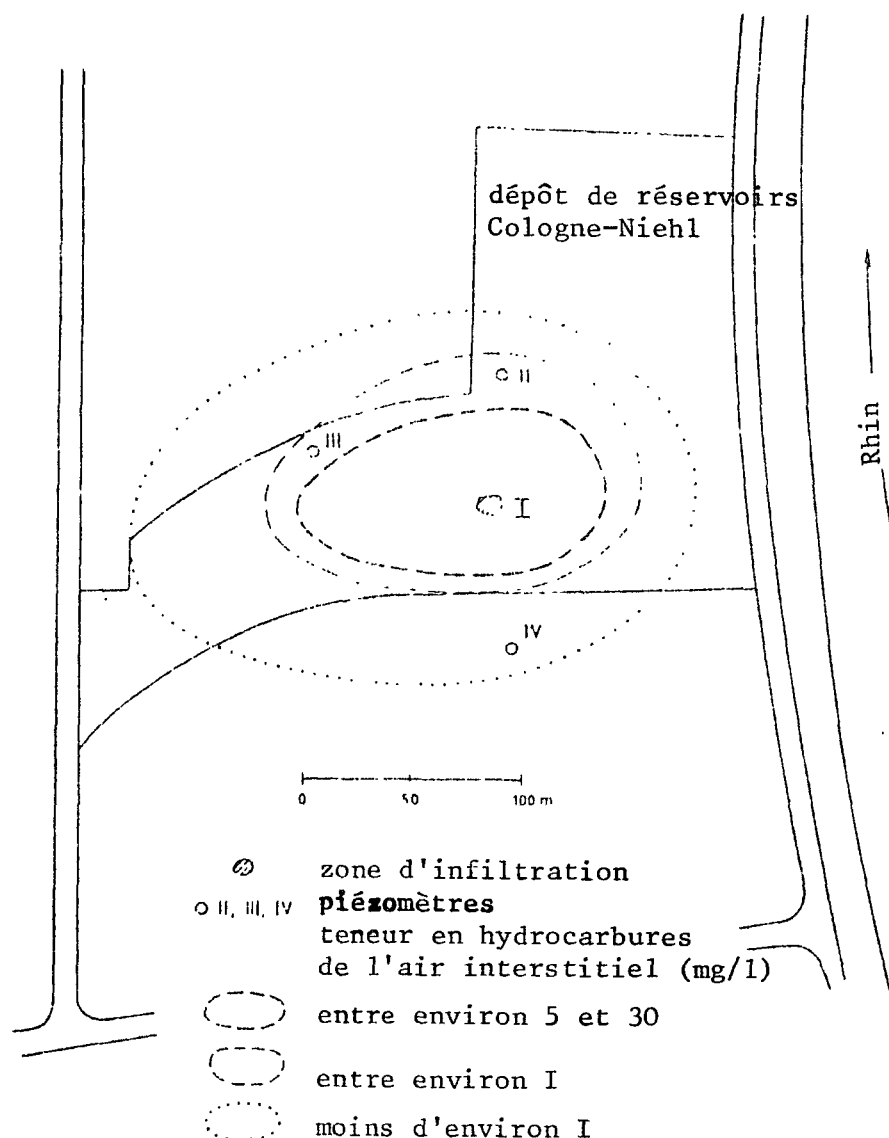


Fig. 4.73 : Cas Cologne-Niehl. Extension des hydrocarbures gazeux dans les pores non saturés au-dessus du bord capillaire (mars 1967)

Cas 31 : Dusseldorf-Reisholz (Rhin inférieur)

De l'huile minérale était apparue en 1943 dans les deux puits I et II d'une usine électrique. On soupçonna que la cause en résidait dans le dépôt voisin de réservoirs de carburants (fig. 4.74). En 1945, le dépôt fut entièrement détruit par des bombes et des grenades. De grandes quantités de carburant, probablement des centaines de m³, se vidèrent et s'infiltrèrent pour la plus grande partie. En 1964, on commença à construire un collecteur d'eau usée le long du chemin entre les puits et le dépôt. Lors du creusement d'une tranchée et de la construction de 2 puits d'abaissement de l'eau souterraine, on a trouvé sur la nappe de l'huile qui y était amassée sur une épaisseur de 10 cm. Il s'agissait d'un mélange de 10 % de bezène et de 90 % d'essence.

Le point de pollution se situe sur les dépôts pléistocènes récents rhénans (basse terrasse). La surface de la nappe se trouve à environ 10-12 m de profondeur (fig. 4.75). Le dépôt se trouve en totalité à l'intérieur du cône de dépression des puits de l'usine, cela encore après l'arrêt du puits I en 1946 et son remplacement par le puits III. Seul le centre de gravité du prélèvement fut ainsi déplacé. Les puits ont fourni ensemble jusqu'à 10 000 m³ d'eau/d avec une dépression de 2 m environ dans les puits.

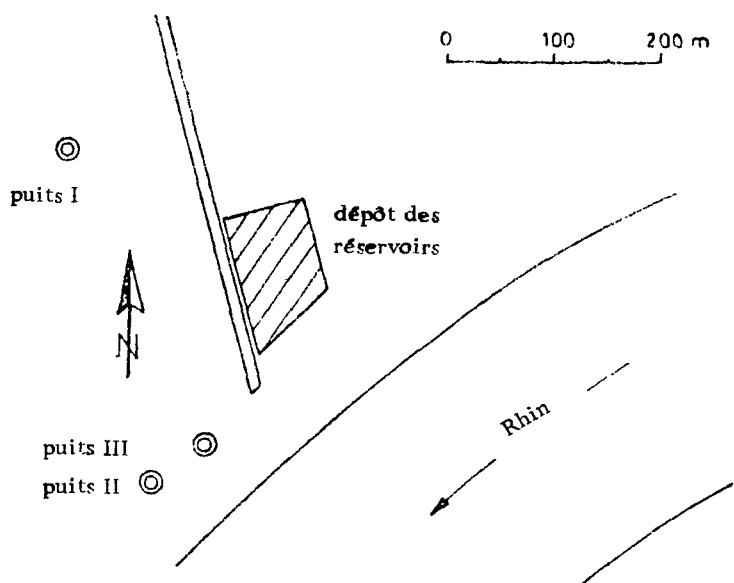


Fig. 4.74 : Cas Dusseldorf-Reisholz. Plan de situation.

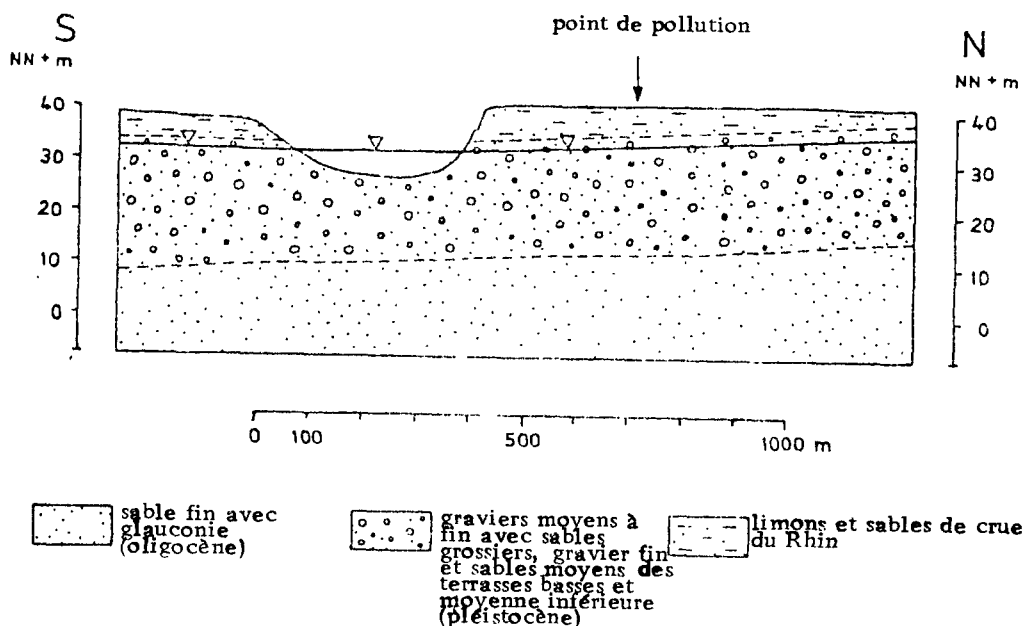


Fig. 4.75 : Cas Dusseldorf-Reisholz. Coupe géologique le long du chemin.

Ce cas est instructif à plusieurs points de vue. Comme suite évidente de la pollution par l'huile, il est formée de l'eau réduite, amenant dans les puits de l'eau ayant une teneur en fer atteignant 20 mg/l. Malgré la teneur gênante en huile et en fer, le puits devait être exploité jusqu'en 1946, ensuite il fut arrêté. Des gaz d'hydrocarbures s'étaient accumulés dans le puits ; à l'occasion de travaux de soudure nécessités pour la remise en état des pompes, les gaz ont causé une explosion.

Les échantillons d'eau, prélevés dans plusieurs piézomètres placés le long du chemin conduisant au dépôt des réservoirs, ont montré que l'eau souterraine y est à l'état très réduite. Des teneurs en fer atteignant près de 40 mg/l y ont été observées, les nitrates avaient disparu, les teneurs en sulfates étaient fort diminuées, la dureté en carbonates (calculée) dépassait parfois la dureté totale (fig. 4.76).

La masse d'huile du sous-sol a été en grande partie réduite par l'évaporation et la dégradation biogénique, ainsi que par le lessivage continu de la flaque d'huile et aussi par les montées et les baisses de la nappe, liées aux variations saisonnières du niveau du Rhin. Deux décennies n'ont pourtant pas suffi pour faire disparaître complètement le carburant. Il est possible que la teneur en benzène a freiné la dégradation biogénique plus fortement qu'en présence d'essence pure.

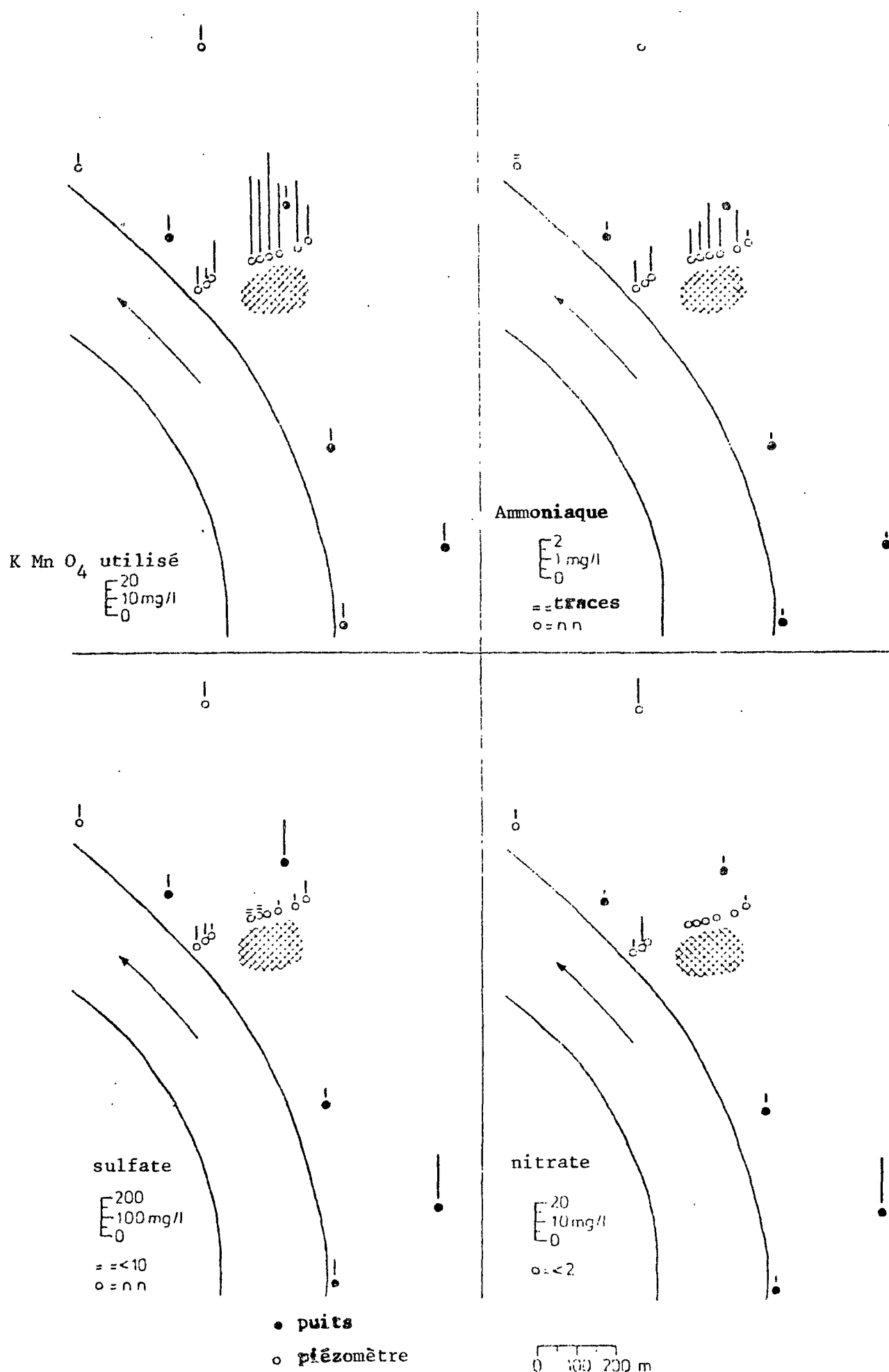


Fig. 4.76 : Cas Dusseldorf-Reisholz. Phénomènes de réduction dans l'eau souterraine.

Cas 32 : Friedrichsfeld-Bucholtswelmen (Lippe inférieure)

Lors de travaux de dragage en vue du déplacement de la rive méridionale du canal Wesel-Datteln en la reculant de 3 m, on a rencontré à une certaine profondeur de faibles venues d'huile et des terres imprégnées d'huile. Le fond et les rives de ce secteur du canal ont été étanchéifiés avec une couche d'argile épaisse de 30 cm et recouvertes d'un paquetage de moellons épais de 50 cm. Les sondages dans le terrain d'une raffinerie voisine ont permis de reconnaître l'extension de l'huile (fig. 4.77).

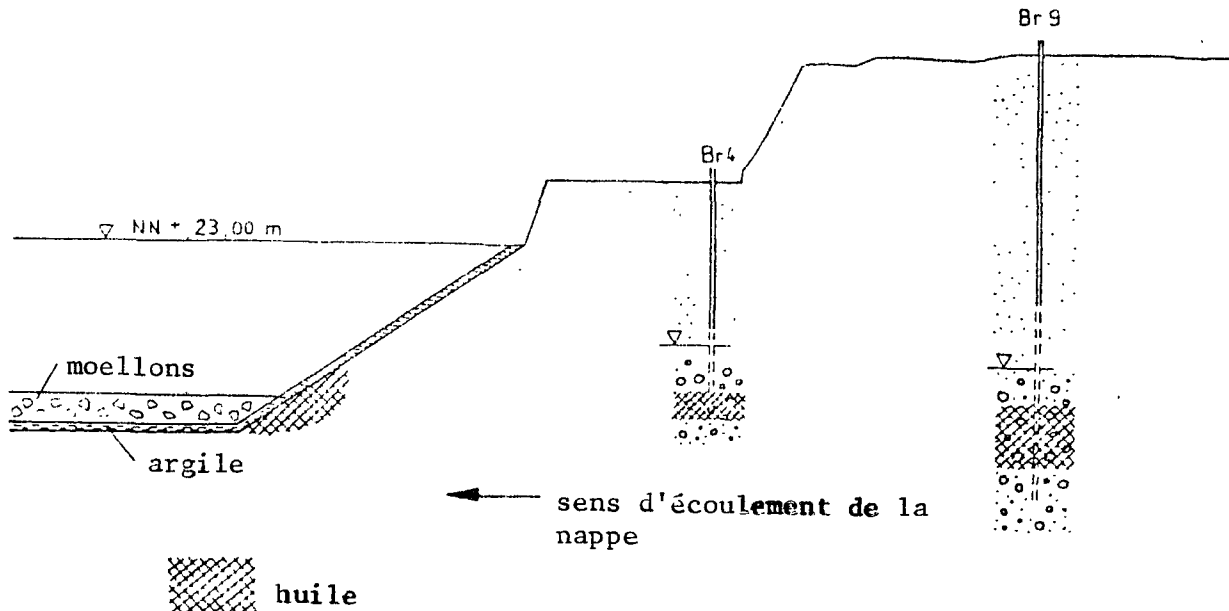


Fig. 4.77 : Cas Friedrichsfeld-Bucholtswelmen. Coupe géologique.

On était surpris de ne trouver dans tous les forages de l'huile (carburant Diesel ou fuel EL) qu'à l'intérieur de la couche de gravier, à environ 1 m sous la surface de la nappe et non pas, comme on s'y attendait, nageant à la surface de la nappe. L'air interstitiel au-dessus de la surface de la nappe était libre d'hydrocarbures. Il est probable que l'infiltration d'huile a eu lieu à l'époque de très bas niveaux de la nappe : cette huile provient d'une station de distribution éloignée d'environ 70 m du canal. Des niveaux compatibles avec la position de l'huile ont existé en dernier lieu au cours des années sèches de 1950 et 1964. La teneur des graviers en huile correspondait à la saturation résiduelle. Il n'était donc pas possible qu'elle surnage plus tard. Etant donné que la nappe se dirige à peu près perpendiculairement vers le canal, l'eau s'est arrêtée au masque d'argile et s'y est accumulée. La pente (environ 1:1,5) de la couche d'argile, liée au rétrécissement de la section d'écoulement, a empêché la remontée de la surface de la nappe.

Cas 33 : Wesel-Obrighofen (plaine basse du Rhin inférieur)

Sur un terrain de transbordement d'essence utilisé pendant la guerre, plusieurs centaines de m³ d'essence se sont infiltrés au cours de quelques semaines vers la fin de la 2e guerre mondiale et ont pollué la nappe de la basse terrasse Rhin-Lippe. L'eau de plusieurs puits individuels étant devenue impropre à la consommation et par crainte d'une pollution de la nouvelle usine d'eau de la ville de Wesel, le cas a été suivi avec attention.

La fig. 4.78 représente les conditions hydrogéologiques des pertes (convenant à toute la zone polluée). La valeur k_f de l'aquifère devrait se placer entre $1 \cdot 10^{-3}$ et $4 \cdot 10^{-3}$ m/s, la vitesse d'écoulement au maximum vers 0,5 m/d. La fig. 4.79 montre la zone polluée maximale, telle qu'elle a pu être fixée. On ne sait pas avec précision jusqu'où l'huile en phase s'était étalée à la surface de nappe, située vers la profondeur de 6 m. Vraisemblablement, la zone à phase d'huile n'a pas dépassé 100-200 m dans le sens d'écoulement de la nappe à partir des limites de la zone d'infiltration. Dans la zone plus étendue de la pollution, la nappe n'était imprégnée que par des particules dissoutes d'essence. L'extension maximale des substances dissoutes était atteinte après 7 ans environ. En dehors de cette zone aucune essence n'a pu être décelée par analyse organoleptique.

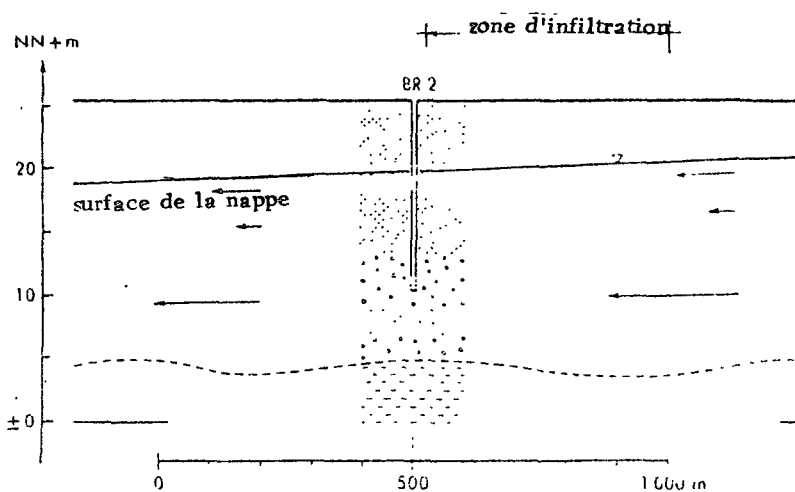


Fig. 4.78 : Cas Wesel-Obrighofen. Coupe hydrogéologique.

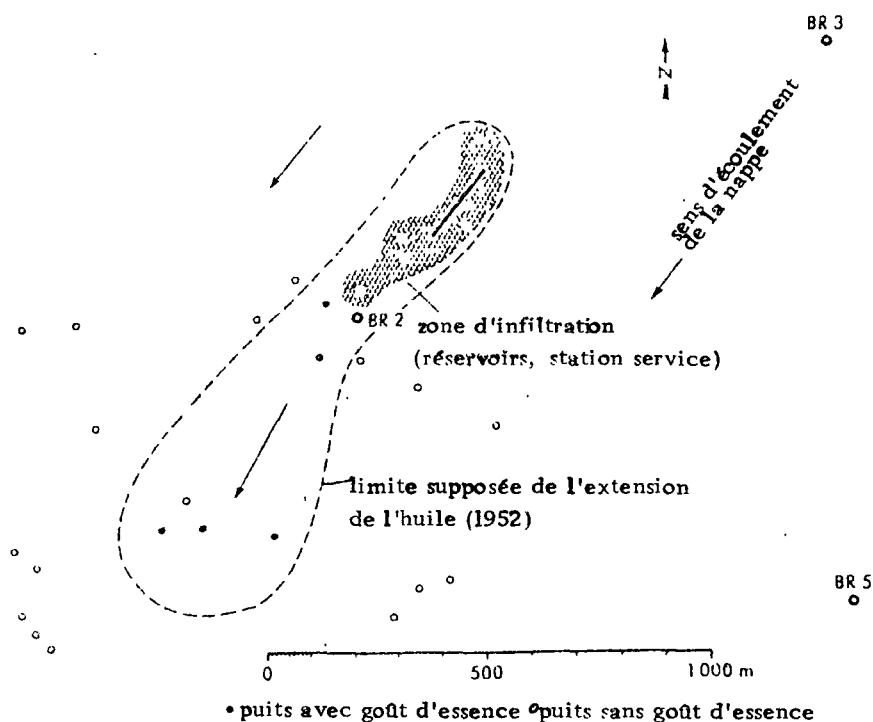


Fig. 4.79 : Cas Wesel-Obrighofen. Esquisse de position de la zone polluée.

23 années après le début de la pollution, le cas était à nouveau étudié, pour suivre l'évolution de la pollution. L'analyse chimique de l'eau ne fournissait aucune indication sur les hydrocarbures, ni sur les indicateurs de réduction. Ce ne fut que l'analyse de l'air interstitiel dans la zone non saturée, qui permit de reconnaître des restes insignifiants d'hydrocarbures étalés sous des anciens emplacements de réservoirs (fig. 4.80). L'évaporation souterraine et la dégradation microbienne ont donc réussi, dans l'espace de deux décennies de faire disparaître complètement une pollution exceptionnellement intense par l'essence.

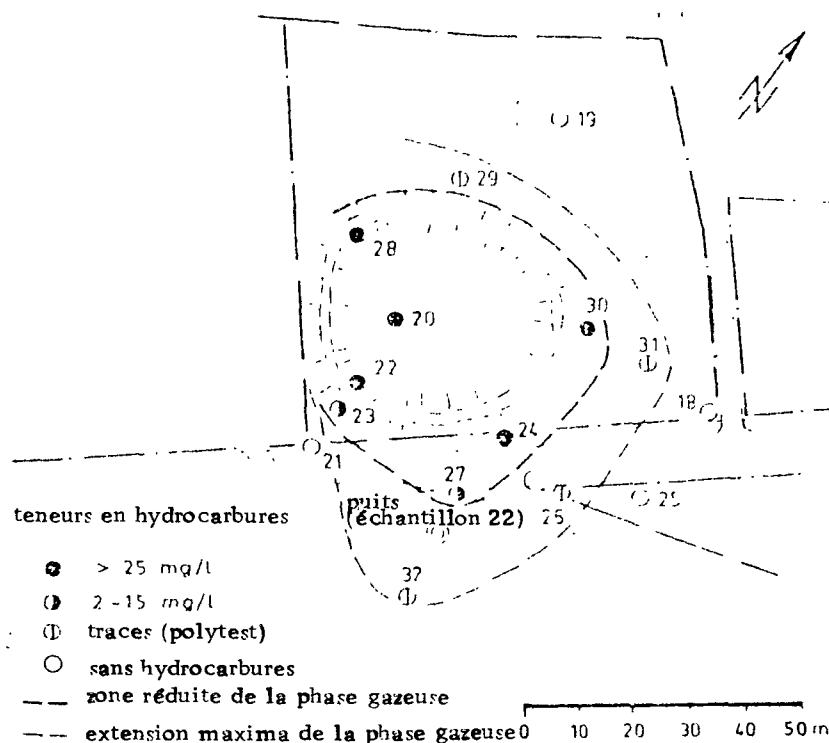


Fig. 80: Cas Wesel-Obrighoven. Résultats des analyses de l'air interstitiel.

Cas 34 : Essen-Kupferdreh (Ruhr)

Lors de travaux de nettoyage dans la salle des chaudières d'une forge de grandes quantités d'huile ont pénétré dans le sous-sol. Le dégât se situait à l'intérieur du cône de dépression du puits de l'usine (fig. 4.81). Environ 10 jours après les pertes, l'huile apparaissait dans le puits. Au cours des travaux de recherche entrepris, on a découvert une autre pollution du sous-sol près du hall thermique, situé lui aussi à l'intérieur du cône de dépression de ce puits. Malgré les grandes dimensions de cet accident, on n'avait jusqu'à ce moment constaté aucune influence sur l'eau souterraine, ni dans le puits de l'usine, ni dans la station de pompage importante voisine.

Les pertes se situent dans la plaine alluviale de la Ruhr, à une distance de 80-90 m d'un lac de barrage. Dans le voisinage des pertes, le sous-sol est formé de 2-3 m de remblai de cendres, scories et alluvions (fig. 4.82). En profondeur, se trouve du limon de débordement, des vases moyennes à grossières brunes, avec alternances de sables. Le limon de débordement forme une couverture continue de 2,5-4 m au-dessus de graviers grossiers, très perméables de la basse terrasse de la Ruhr, complètement gorgée d'eau. La nappe de la terrasse est en charge, car le niveau d'eau du lac de barrage voisin dépasse de 1-2 m la base des limons.

Dans les pertes de la salle des chaudières, la couche de limons n'était pas en mesure de retenir l'huile s'infiltrant en grande masse d'un seul coup ; à cause de la forte suppression l'huile l'a traversée et s'est répandue dans l'aquifère. Entre les pertes et le puits pollué s'est formée une étroite flaque d'huile. Tout autre était la situation dans la région du hall thermique. Le sondage P2 devant le hall a rencontré 1,10 m de limon fortement imprégné d'huile au-dessus graviers aquifères de la Ruhr. Les graviers et la partie supérieure des limons étaient sans huile. D'autres sondages ont trouvé les limons imprégnés de la même façon, d'huile. En tout, cette imprégnation s'étendait sur environ 2500 m² et une épaisseur de 0,30-0,60 m en bordure et 1,20 à 1,50 m devant le hall. A l'intérieur de la zone polluée par huile, le limon, normalement de teinte jaune-brun, était intensément coloré en gris-vert par réduction. Des extraits aqueux de terre ont donné une réaction légèrement acide et de grandes quantités de Fe²⁺.

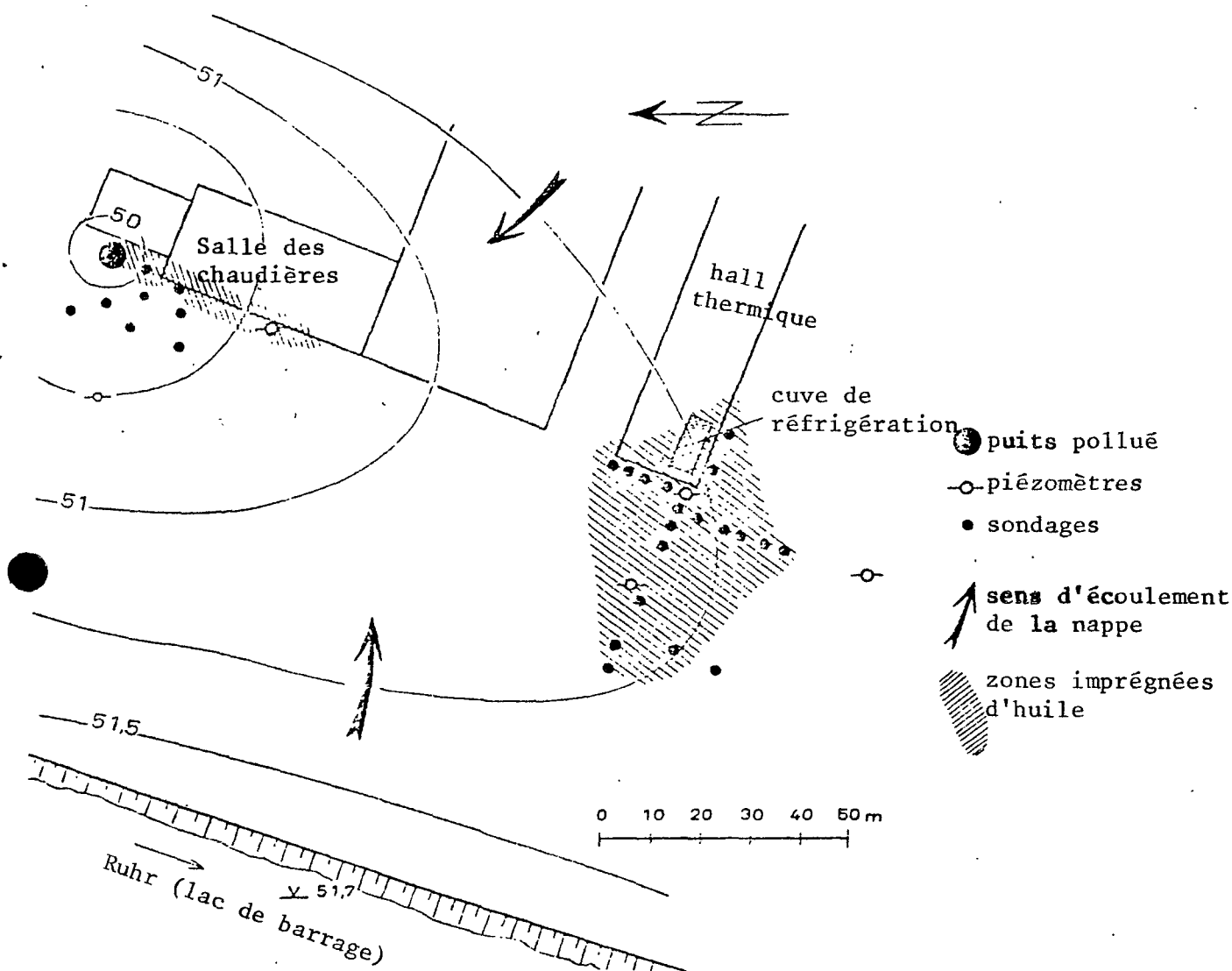


Fig. 4.81 : Cas Essen-Kupferdreh. Esquisse de position.

Dans le hall thermique se trouvent de grandes cuves d'acier remplies d'huile. L'une est en service depuis plus de 30, l'autre depuis environ 20 ans. Sous la cuve la plus ancienne en service se trouvait la flaque d'huile dont l'extension a été décrite plus haut ; sous la 2e cuve, on a trouvé une flaque imprégnée de moindres dimensions. Dans les cuves, les pertes d'huile atteignent plusieurs milliers de litres par an. Elles sont dues en partie à l'évaporation d'huile lors de la trempe des pièces chauffées à blanc ; en partie elles sont dues aussi au débordement d'huile au moment de la plongée des pièces et de l'égouttement de l'huile après la sortie du bain. Les examens au spectre IR ont montré l'identité de l'huile des cuves des baigns et des celles des extraits des sols.

Tous ces faits montrent que la pollution vient des cuves qui ont perdu de petites quantités d'huile durant des temps très longs. L'examen des cuves n'a montré aucun défaut qui aurait permis l'écoulement de grandes quantités d'huile. En s'infiltrant peu à peu à partir de la surface, l'huile s'est étalée en flaque dans la couche peu perméable couvrant l'aquifère. Dans deux piézomètres, au cours de 5 années d'observations, on n'a trouvé dans les graviers que des teneurs en huile atteignant au maximum 40 mg/l. Même lors du pompage, on n'a fait sortir de la couche polluée par moment que 2 à 6 g/l.

Il n'était pas possible d'enlever la terre polluée car pour ce faire, il aurait fallu démolir les ateliers et neutraliser une voie ferrée fédérale très exploitée. Depuis lors un contrôle continu est exercé sur la nappe de la zone polluée, ceci pour pouvoir intervenir dès que l'on constaterait une modification des conditions hydrauliques de l'aquifère susceptible de se répercuter sur les puits voisins.

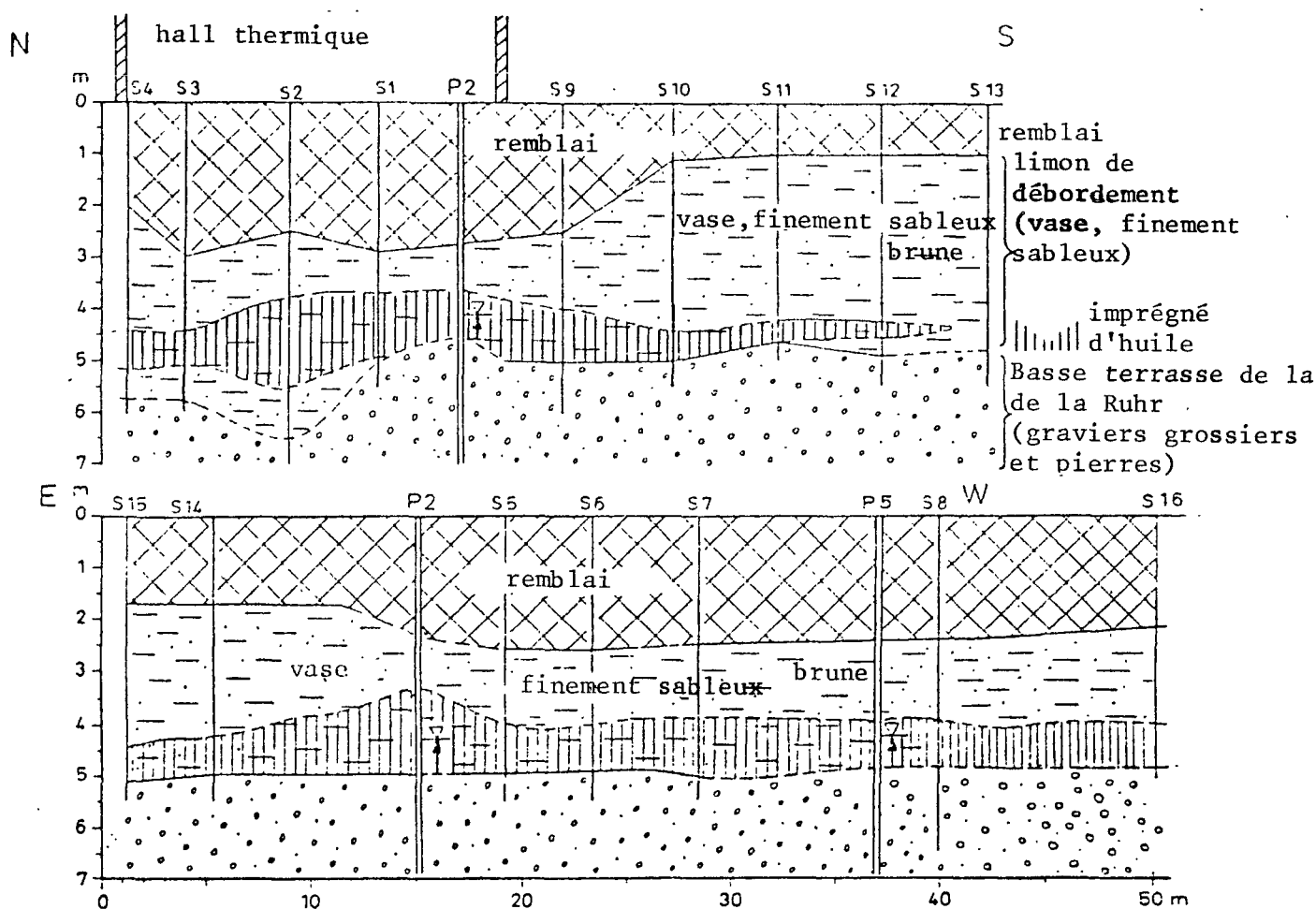


Fig. 4.82 : Cas Essen-Kupferdreh. Coupes à travers la flaque d'huile dans la région du hall thermique

Cas 35 : Munster (Munsterland)

Dans la zone portuaire de Munster se trouve un dépôt de réservoirs, drainé par des canalisations de tuyaux. Le collecteur principal traverse le canal voisin au moyen d'un siphon. A plusieurs reprises, de grandes quantités d'huile furent constatées dans la bêche de départ du siphon et enlevées par pompage. L'huile ne pouvait venir que de ce dépôt. Mais il n'était pas clair comment elle pouvait arriver dans la bêche de départ.

Des sondages ont permis de constater que, dans la région du dépôt, le sous-sol était, selon la variété du sol, plus ou moins imprégné d'huile jusqu'à la profondeur de 2 m environ. La surface de la nappe se situait vers plus ou moins de 2 m de profondeur. A cause du peu de perméabilité du sol (vases sableuses, sables vaseux, argile), la pollution s'est limitée à la région du dépôt. Le bord de la flaque d'huile se trouve à au moins 100 m du regard de départ du siphon. La fig. 4.83 montre une coupe géologique simplifiée à travers la zone polluée. Le puits n'a d'ailleurs pas été atteint par la pollution.

Les fossés des drains ayant été remblayés avec des terres insuffisamment étanchéifiées, ils ont joué le rôle de drains pour l'huile, qui a pu s'y accumuler, y circuler et pénétrer dans les tuyaux grâce à certains défauts (par exemple des fentes de poussée). De tels remblais sont toujours susceptibles de servir de drains, surtout dans des terrains peu perméables ; ils peuvent ainsi servir de voies artificielles pour la circulation des huiles.

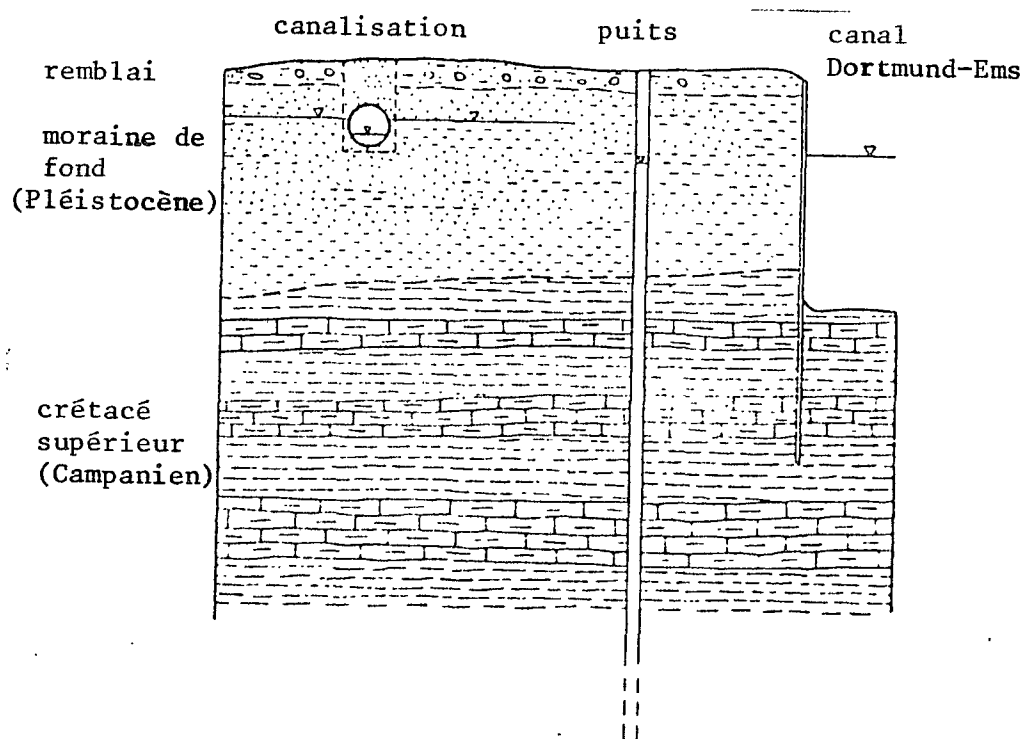


Fig. 4.83 : Cas Munster. Coupe géologique.

Cas 36 : Dortmund (Ruhr)

Le terrain d'une ancienne installation de nettoyage et de traitement du benzène, arrêtée en 1977, devait être transformé pour des besoins non industriels. Une ordonnance administrative visa à rechercher dans quelle mesure, au cours des 70 ans d'exploitation, des substances nocives avaient pu polluer le sous-sol et les eaux souterraines et à préciser les mesures à prendre.

Le terrain industriel, 60 000 m² environ, est situé sur les bords de la plaine alluviale de l'Emscher, à 1 km du fleuve, dans la région des dépôts holocènes et pléistocènes du fleuve. Le sous-sol des dépôts quaternaires de la vallée est formé de marnes et marnolithes dures, peu fissurées du Crétacé supérieur westphalien. Dans le terrain industriel, sous un remblai hétérogène de scories, cendres, matériaux de démolition, les dépôts fluviatils meubles sont épais de 4 à plus de 10 m. Dans toute leur épaisseur, ils sont formés de vases finement sableuses (limon de vallée). 40 analyses granulométriques ont donné la composition suivante :

argile	~ 5 %
vase	70-90 %
sable fin	10-20 %
sable moyen	
à grossier	~ 5 %

Les dépôts de vallée quaternaires sont peu perméables. Des essais de perméabilité ont donné des valeurs k_f entre 2.10^{-8} et 5.10^{-8} m/s. Ils ne renferment d'eau que sous la forme d'humidité absorbée peu mobile.

Pour étudier le cas, on a poussé 12 forages en partie jusque dans les marnes crétacées (fig. 4.84). Lors des forages, la nappe fut trouvée vers 2-3 m de profondeur ; à la fin et après une longue période de pluies, le niveau remonta vers quelques décimètres de profondeur. Le déplacement de l'eau se fait avec une faible pente et des petits écarts de quelques cm à dm dans l'année vers le Nord, en direction de l'Emscher.

Dans le terrain industriel, la pollution était à peine perceptible ; la terre n'était souillée superficiellement qu'aux points de déchargement. Mais les analyses d'air interstitiel sur leur teneur en hydrocarbures (KW) ont montré dans le centre du terrain de fortes charges en hydrocarbures dérivées du benzène. Les valeurs se situaient entre quelques centaines et plusieurs milliers ppm KW. En dehors de cette zone, l'air interstitiel était libre de KW ou n'en contenait que de faibles parties.

Les forages implantés à la suite n'ont pas fourni de benzène en phase. Même après des temps d'observation assez longs, le benzène ne s'est pas accumulé sous des épaisseurs mesurables à la surface de l'eau. Ce n'est que dans la zone principale de décharge qu'est apparu un film fin, brun, foncé, à odeur forte de benzène, à la surface de l'eau.

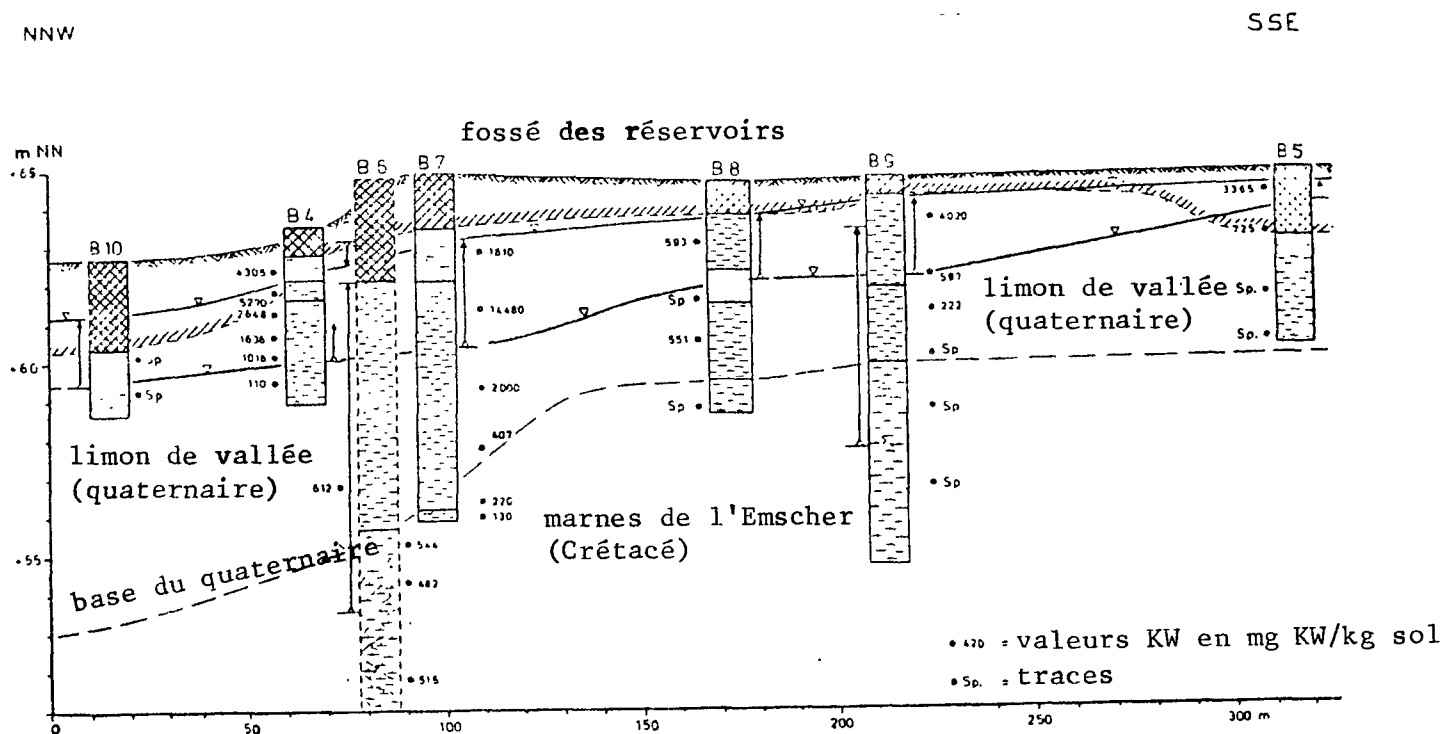


Fig. 4.84 : Cas Dortmund. Coupe géologique avec les teneurs du sol en hydrocarbures de benzène (mg/kg).

L'examen des échantillons de sol a montré que le sous-sol était profondément contaminé dans les environs des ateliers c'est-à-dire dans la zone où l'air interstitiel contenait de fortes concentrations en KW. Au voisinage des principales sources de contamination (appareils à distiller, dépôts et distributeurs), la pollution avait traversé la totalité des dépôts meubles quaternaires loin au-dessous de la surface de la nappe et avait par places pénétré jusque dans les marnes crétacées sous-jacentes. Les teneurs en hydrocarbures benzéniques des échantillons de sol variaient entre plusieurs milliers de mg KW/kg sol dans les parties supérieures et quelques centaines de mg KW/kg sol en profondeur. Dans le forage 6 dans le courant souterrain d'un bac à réservoirs, à la profondeur de 12,5 m, la teneur était encore de 515 mg KW/kg sol (fig. 4.84).

Ce n'est que dans les sondages, dont le sous-sol était fortement pollué en KW, que l'eau souterraine contenait aussi du KW soluble. Les échantillons en provenant sentaient nettement le benzène, avaient une teinte jaune-breun et contenaient en grande quantité du fer dissous, qui, à l'air, flocculait en dépôt brun d'hydroxyde de fer. Le pH était neutre à faible basique. Les teneurs de l'eau en hydrocarbures benzéniques (surtout benzène, aussi xylène, toluène, naphthaline) variaient entre 100 et 200 mg/l ; dans un sondage, elles dépassaient 1 100 mg/l. La charge des eaux des marnes crétacées diaclasées était plus faible ; elle n'était que de 20 à 30 mg/l.

Une extension latérale sensible des hydrocarbures dissous dans l'eau en dehors du centre de la pollution n'a pas eu lieu et ce malgré la très longue durée pendant laquelle celle-ci a dû se poursuivre. Les échantillons d'eau des sondages sur les bords du terrain industriel étaient sans KW ou n'en contenaient qu'en concentration insignifiante. Mais il est certain que le trafic durant des décennies avec des substances dangereuses pour l'eau a entraîné une contamination profonde du sous-sol et de l'eau y contenue. Grâce aux circonstances - le fort pouvoir de retention des couches concernées et le peu de mobilité de la nappe - la contamination ne s'est pas étalée et n'a pas entraîné de dégâts pour le voisinage.

Les couches affectées étant sans intérêt pour l'économie de l'eau et le peu de risque d'extension des hydrocarbures - d'autant plus que les causes de pollution ont été supprimées entre-temps - on a renoncé à engager des mesures coûteuses d'assainissement ; toutefois il est prévu que toute intervention affectant le sous-sol doit être accompagnée de mesures propres à éviter la pollution par le terrain contaminé et l'eau s'y trouvant.

Cas 37 : Schermbeck, Dämmerwald (Rhin inférieur)

Environ 1300 m³ d'huile brune ont jailli par une fente de pipeline. L'huile a pollué environ 1,3 ha plantés d'épicéas et s'est écoulee par des fossés de drainage dans un ruisseau où il a été possible de la recueillir. 800 m³ ont été récupérés ; environ 170 m³ ont dû s'évaporer ; 330 m³ environ ont dû rester sur le terrain. Cette quantité, répartie de façon régulière, donnerait une infiltration de 25 mm environ, 25 l/m³ d'huile brute. L'accident a eu lieu au cours d'une longue période de sécheresse.

Dans la région des pertes affleurent les argiles à septaries (tertiaire) sur une grande épaisseur, compactes à l'état frais, par absorption d'eau devenant une vase plastique, très argileuse. Sur ces matériaux imperméables repose une mince couche (100 cm) de moraines pléistocènes (sable fin vaseux) et de sables éoliens (sable à grain égal et vase).

Il n'y a donc pas de nappe souterraine, tout au plus de l'humidité absorbée. Le type de sol dominant est le pseudogley. C'est pourquoi le cas paraîtrait sans intérêt. C'est surtout la répartition de l'huile dans le sol qui paraît importante. 8 mois après les pertes, en été, furent prélevés des échantillons de sol pour déterminer leur teneur en huile.

Profondeur de prélèvement des échantillons de sol	huile en kg/ha	
couche d'humus	31 900	} 41 700
sous-sol, profondeur		
0-10	2 700	
10-20	1 600	
20-30	1 700	
30-40	2 000	
40-50	1 800	

Selon toutes apparences, l'huile avait d'abord détrempe la couche d'humus. La majeure partie, environ les 3/4 de l'huile, ont été ainsi retenus dans l'horizon supérieur du sol (l'expression "sol" étant employée ici dans son sens pédologique). Dans les couches argileuses, la répartition de l'huile était limitée aux trous de racines et aux diaclases (plans de discontinuité).

Cas 38 : Herrenstätt (pays d'Ems)

A la suite d'un défaut d'un oléoduc, environ 1500 m³ d'huile brute se sont écoulées et répandues sur environ 10 ha de terres et de prés. Tandis qu'une partie des composés volatils de l'huile s'évaporait rapidement, une autre partie s'infiltrait dans le sol ; une grande partie s'écoulait vers un système de fossés en contrebas où on a pu la recueillir.

Le type de sol pollué est de la catégorie des sols bruns reposant sur des argiles à blocs. L'horizon à humus était épais de 25-30 cm. A partir de 60 cm, le sol devenait plus compact pour prendre le caractère d'un pseudogley à partir de 80 cm. Dans la région des pertes affleurent un sable humifère (sable grossier à fin) avec une faible teneur en argile et vase. Les couches plus profondes, ayant gardé une plus forte teneur en argile, sont plus liantes.

L'huile écoulée est de l'huile brute d'Iran (Agha Jari) d'une viscosité de 8,80 cm (20° C) et d'une teneur en benzène (jusqu'à 200° C) de 28,4 vol. %. 25 l d'huile seulement furent retenues par m³ de terre car en raison de pluies abondantes, la terre était gorgée d'eau.

La fig. 4.85 représente la répartition de l'huile en deux fouilles (I à proximité des pertes, 2 : 250 m plus loin) après 1 mois resp. 25 mois du début des dégâts. A l'époque des fouilles au bout d'un mois, les champs n'étaient pas encore labourés (chaumes). L'huile avait pénétré jusque vers environ 100 cm dans le sol. Après 24 mois, le sol ayant été profondément labouré, la teneur en huile aux environs de 1 avait beaucoup régressé. Aux environs de 2, la régression était moins forte ; cette surface n'ayant pas été labourée, la dégradation se faisait moins vite. On a été surpris d'y constater un enrichissement en huile entre 60 et 90 cm de profondeur.

En vue de l'exploitation agricole, il y a lieu de retenir ceci.

- a. La croissance des plantes a été fortement freinée par la présence de l'huile dans le sol. La cause des dégâts était finalement la perturbation par l'huile de l'alimentation en eau et en éléments nutritifs des plantes. Aucune influence toxique de l'huile sur les plantes n'a été observée.
- b. L'affouillement profond et l'apport de substances organiques (le fumier d'étable s'est révélé le plus efficace, la paille et la tourbe étaient moins actives) en améliorant la structure du sol, a favorisé le rétablissement de la fertilité du sol. Le labour profond a en même temps favorisé la dégradation de l'huile dans le sol.

Cas 39 : Ochtrup (pays de Munster septentrional)

Par la fente d'un coude de tuyau d'une station de pompage d'un pipe-line se sont écoulés au début de décembre 1972, environ 800 m³ d'huile brute en deux fois 10 minutes. Il s'agissait d'une huile brute importée ayant une viscosité de 5 à 8 cSt à 10° C. L'huile s'est écoulée à partir de la station par des fossés de drainage vers un ruisseau, en partie par-dessus le système de canalisation du terrain de pompage vers un bassin. Le long des fossés, elle a inondé des prés voisins. Une partie s'est évaporée au cours de sa sortie et a couvert les prés sous le vent. Pour éviter une plus grande extension de l'huile, on a barré les fossés et le ruisseau : l'huile accumulée devant les barrages a été enlevée par des voitures citernes. Les prés et les bords des fossés pollués ont été nettoyés dans la mesure du possible par arrosage et par brûlage.

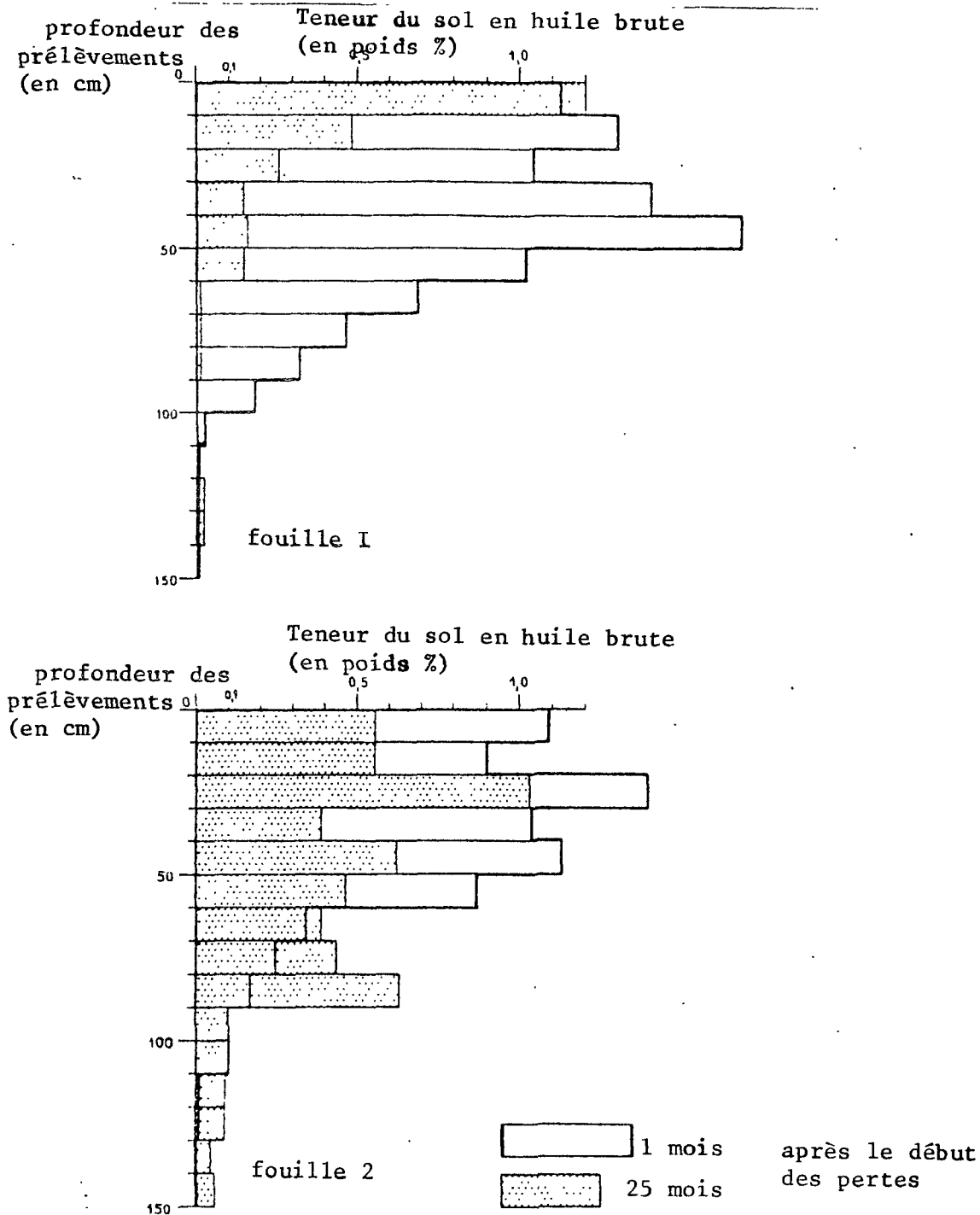


Fig. 4.85 : Cas Harrenstätt. Teneur du sol en huile.

Aux environs des pertes, sous des sables vaseux argileux, épais de 0,7 m, affleurent des argiles du Crétacé inférieur, épais de plusieurs centaines de mètres. Il n'y a pas de nappe d'eau souterraine, les couches en surface ne renferment que de l'humidité absorbée. L'huile n'a pénétré dans le sous-sol que sur 3-5 cm au maximum. On a donc décidé de laisser le sol imprégné d'huile en place, de le flamber et de le travailler intensément pour provoquer une forte aération devant entraîner une dégradation microbienne accrue. Des parcelles traitées avec une chaux spécialement préparée pour lier l'huile se sont remises bien plus lentement que les parcelles soumises aux seules façons agricoles.

Bien que dans ce cas aucune pollution n'était à craindre, le coût des travaux d'assainissement s'est élevé en tout à environ 1 million de DM.

Cas 40 : Georgsdorf (pays d'Ems)

A la suite d'un défaut dans un sondage pétrolifère, il s'est produit une éruption de gaz et d'huile, rejetant environ 35 000 m³ de pétrole au cours de 10 jours. Cette grande quantité d'huile ne pouvait être ramassée qu'à l'intérieur de digues de terre hâtivement levées.

Etant donné que le point de pollution était situé à l'intérieur de la zone des prises d'eau d'une commune et qu'une contamination de l'eau n'était pas à exclure par le séjour à l'air libre de l'huile, on a organisé un service de surveillance de la nappe souterraine, en y incluant les 21 puits existants et 10 piézomètres supplémentaires (fig. 4.86). L'enlèvement de l'huile a nécessité plus de 2 ans.

Ainsi que le montre la fig. 4.87, il y a dans la zone polluée deux aquifères dont le plus profond est exploité pour l'eau. La surface de la nappe de l'étage supérieur était située vers la profondeur de 1,5 m environ au moment de la pollution. Les recherches étendues sur la composition de l'eau n'ont révélé que de faibles odeurs dans les piézomètres les plus rapprochés des pertes et une faible augmentation de la teneur en chlorures dans les niveaux élevés de l'aquifère supérieur. La cause de cette faible pollution de l'eau souterraine est à rechercher dans les qualités physiques de l'huile - une huile typique du pays de l'Ems. Cette huile très visqueuse (viscosité 290 cP à 20° C, point de liquéfaction + 9° C) ne pouvait pénétrer dans le sol que sur quelques cm. La masse pâteuse empêchait un lessivage de l'huile par les précipitations. L'élévation de la teneur en chlorures est due à l'entraînement d'eau de gisement lors de l'éruption.

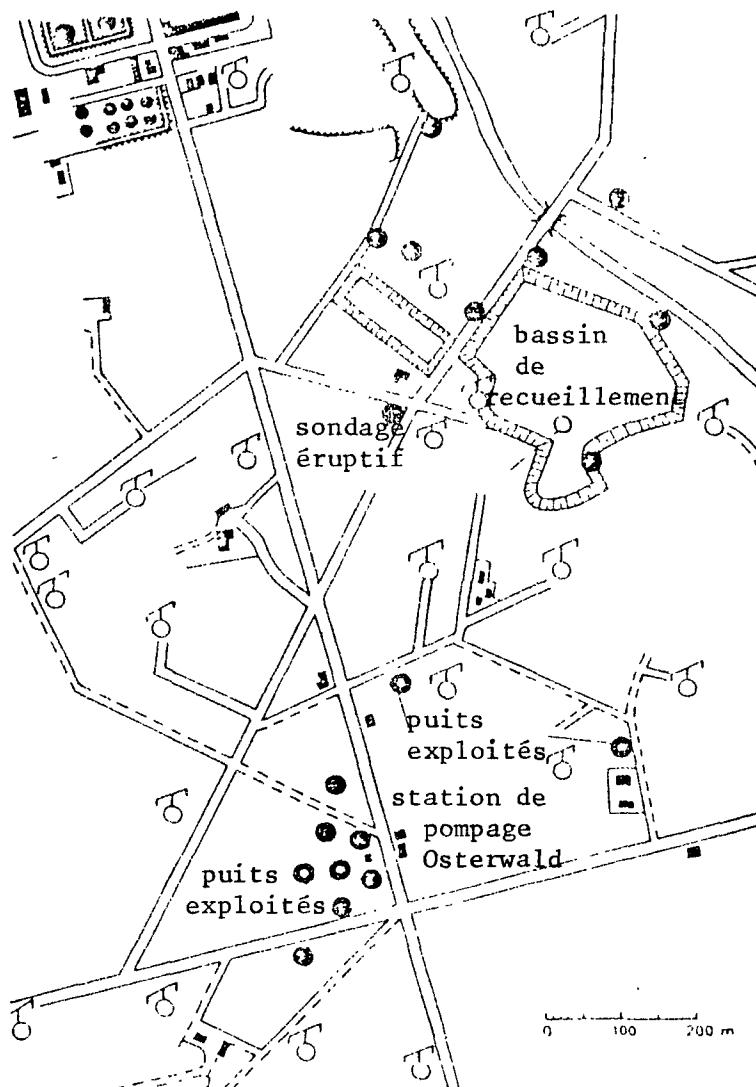


Fig. 4.86 : Cas Geargsdorf. Esquisse de situation.

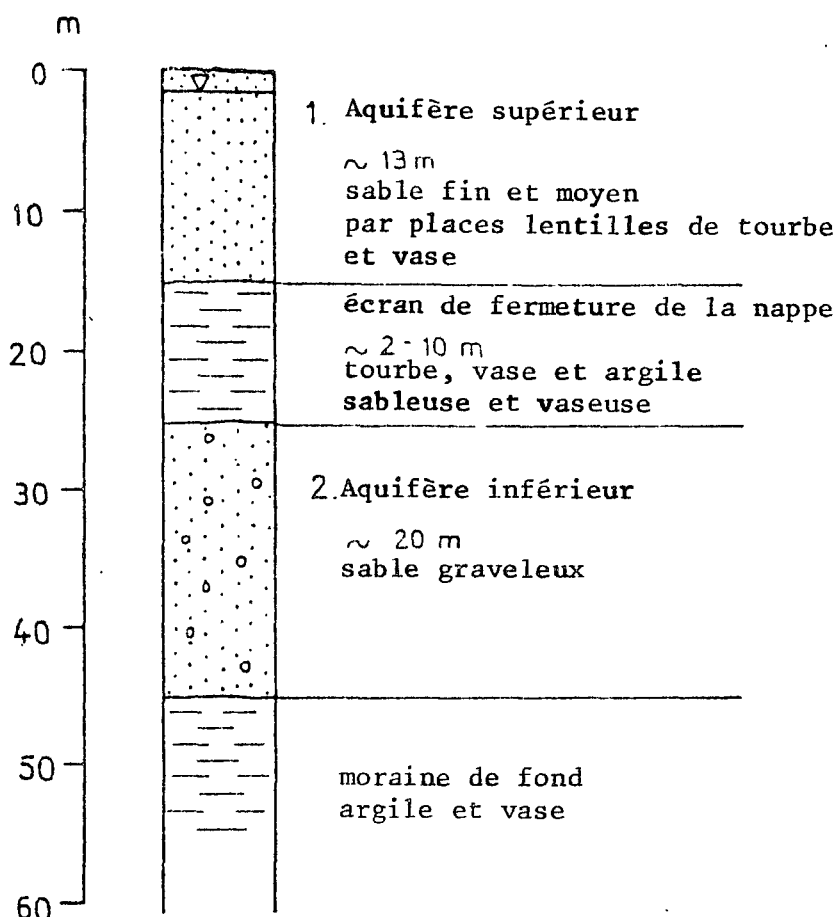


Fig. 4.87 : Cas Georgsdorf. Suite des couches.

Cas 41 : Scheerhorn (pays d'Ems)

Environ 2 000 m³ d'huile se sont échappés d'un sondage productif. Une surface d'environ 70 ha (près surtout) fut alors aspergée, la masse d'huile couvrait une surface de 2 ha. En raison du point élevé de liquéfaction, 22° C, l'huile a pénétré à peine dans les sables fluviatils affleurant ; il a été possible de l'enlever à la pelle.

Bien que l'huile ait été exposée aux précipitations de la saison humide durant plusieurs mois, il semble qu'il n'y ait pas eu pénétration dans l'eau souterraine de masses importantes de produits solubles. Dans les puits individuels situés 350-750 m à l'aval dans la direction d'écoulement de la nappe, exploitant l'eau de l'aquifère supérieur à surface libre, aucune contamination n'a jamais été constatée.

Cas 42 - Rouen (Haute-Normandie)

Plus de 900 m³ de fuel oil domestique se sont déversés par suite d'une fuite dans des installations de stockage de la zone industrielle de Rouen, situées dans une boucle de la Seine. Par des travaux d'excavation, environ 130 m³ ont été récupérés durant les 12 premiers jours. Néanmoins, la plus grande partie (environ 800 m³) s'est infiltrée dans le sous-sol.

Le lieu de l'accident se situe dans la région des dépôts holocènes de la Seine. Sous une couche de remblai de 1 à 2 m, de 3 à 4 m et en dessous, jusqu'à 12 m sous le niveau du sol, des sables fins, des sables et des graviers (figure 4.88). Sous ces dépôts fluviatils, on atteint la craie blanche du Coniacien-Santonien. Le niveau piézométrique se situe à 4 à 5 m de profondeur ; la nappe est le plus souvent libre, par endroits légèrement captive. L'eau souterraine de la craie est exploitée par plusieurs forages d'alimentation en eau potable.

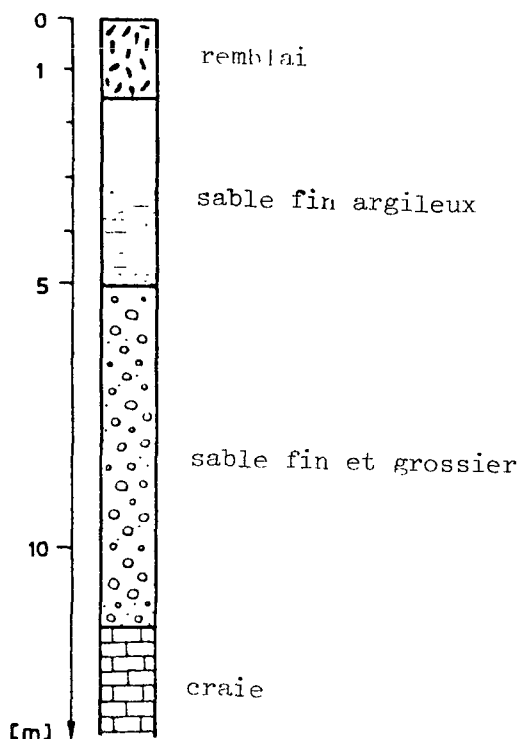


Fig. 4.88 : Cas Rouen. Coupe géologique

Des discontinuités dans la couche d'argile ainsi que le remblayage de cratères de bombes et d'anciens terrassements ont favorisé l'infiltration de l'huile. La surface d'infiltration de l'huile s'étendait sur environ 4.500 m². Afin d'arrêter la propagation du produit pétrolier au toit de la nappe, on a foré un puits F1 de 12 m de profondeur et après un débit de pompage initial plus élevé on a ramené ce débit à 56 m³/h. On a réalisé 12 puits de récupération creusés à la pelle mécanique et équipés de buses en béton avec garnissage de gravier à l'extérieur. L'huile surnageant ces puits a été récupérée périodiquement. Par ce procédé on a récupéré 260 m³ de fuel.

Grâce à un réseau de 38 piézomètres, il a été possible de connaître avec une précision relativement bonne l'extension de la lentille de fuel et des hydrocarbures solubles dans l'eau (figure 4.89). La surface d'extension

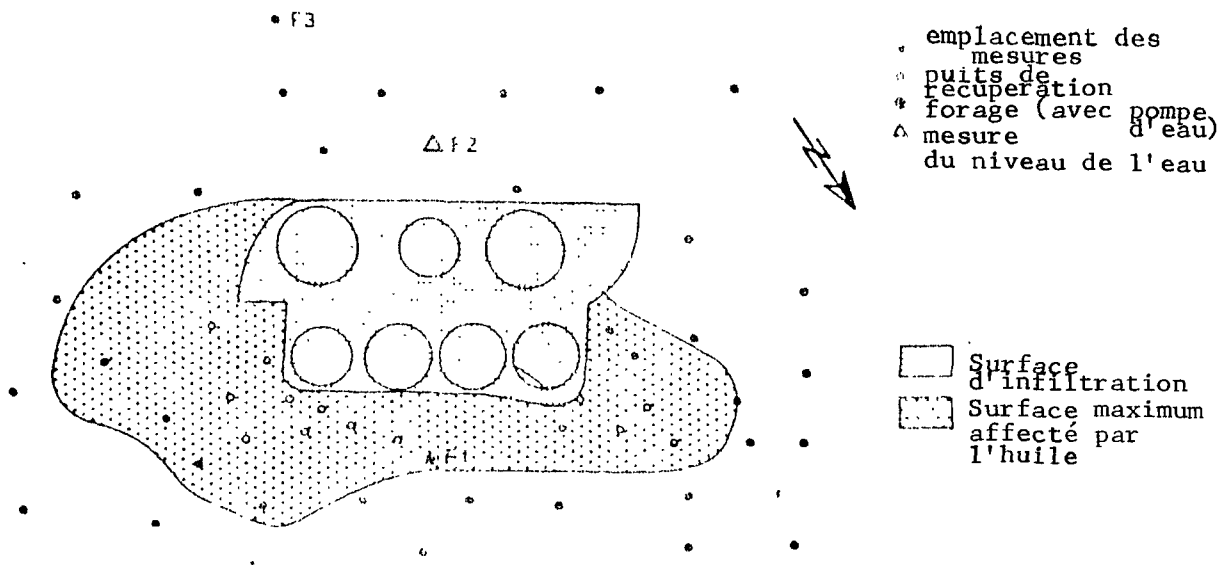
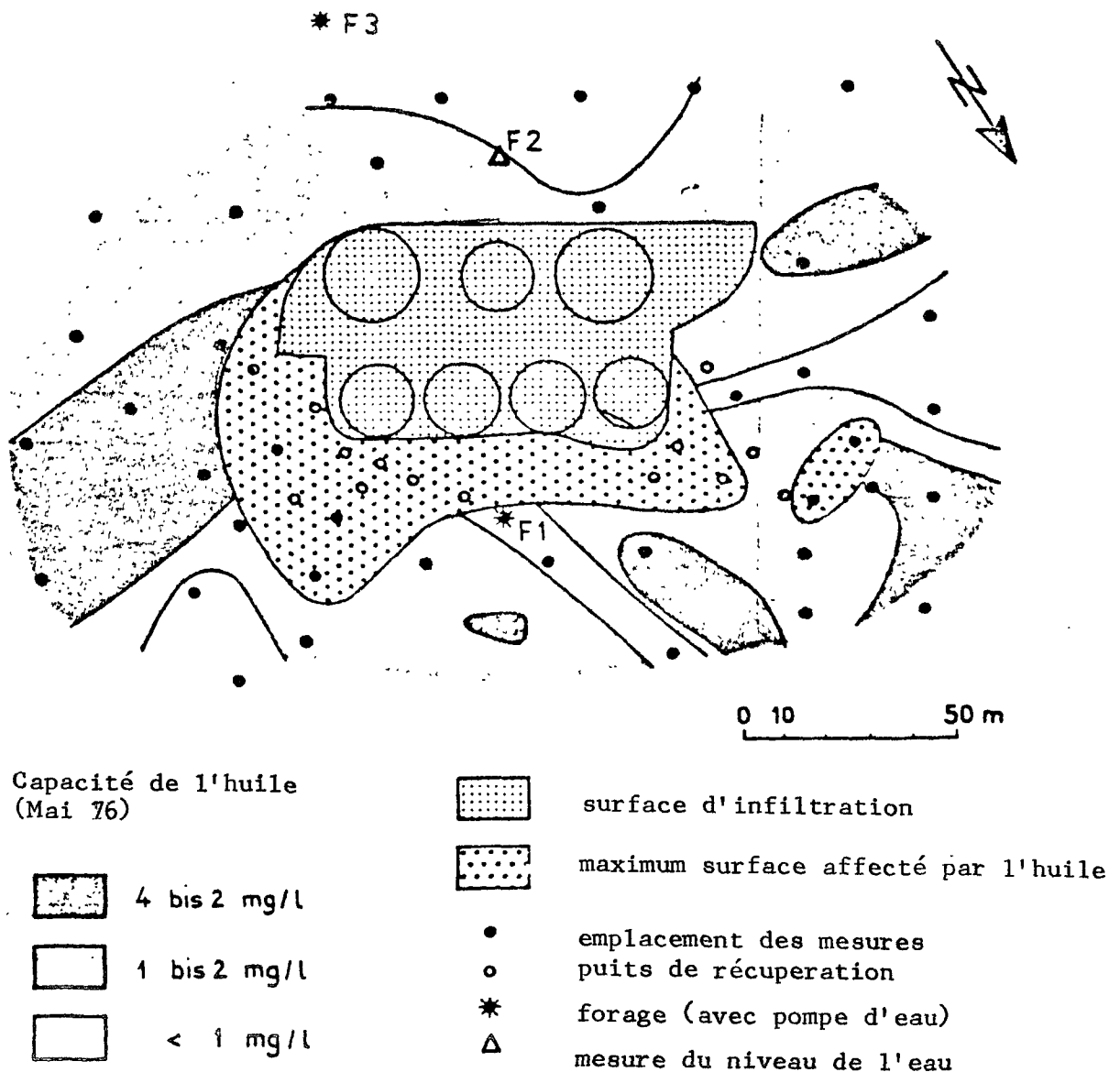


Fig. 4.89 Cas Hoenheim. Schéma de la situation 50 m Extension de l'huile

maximale de la lentille de fuel est de 11.000 m². Si l'on évalue la quantité maximale d'huile retenue dans le domaine d'infiltration verticale à environ 200 m³, alors la quantité d'huile ayant atteint le toit de la nappe est de 600 m³ au début et plus tard, après le fonctionnement des 15 puits de récupération, elle se chiffre encore à 340 m³. Si l'on tient compte de la surface d'étalement maximale de la lentille de fuel, on obtient pour l'épaisseur D d'huile respectivement 55 et 30 l/m². Dans l'ensemble, ce cas indique que par les mesures de sauvegarde mises en oeuvre des quantités importantes d'huile ont pu être récupérées, mais que plus de la moitié du fuel déversé est restée dans le sous-sol. Il est à noter que dans le domaine d'infiltration verticale on a trouvé les quantités les plus fortes de fuel dans le remblai, près de 4 fois plus que dans l'argile.

La vitesse d'écoulement de l'eau souterraine a été déterminée par traçage coloré à 0,5 m/jour. Alors que la lentille d'huile est demeurée relativement stable, les substances dissoutes se sont répandues au-delà du corps d'huile. La teneur en produits solubles à l'extérieur de la lentille d'huile a toujours été en dessous de 5 mg/l. Par suite des diverses directions d'écoulement qui sont dues aux captages d'eau souterraine se sont formées de véritables langues avec des hydrocarbures dissous (figure 4.90).

En relation avec la surveillance de ce cas, la teneur en huile d'échantillon d'eau prélevé dans les puits de captage de cette boucle de la Seine a été déterminée et comparée à des valeurs plus anciennes. On a pu en déduire qu'il existait d'autres foyers locaux de contamination qui n'ont aucun rapport avec le cas décrit ci-dessus.



Fig

Fig.4.90 Cas Rouen.

Extension de l'huile

Cas 43 : Rheinfelden (Suisse) (Vallée du Rhin supérieur)

A l'extrémité d'un tronçon d'autoroute venant d'être réalisé, un accès définitif et une sortie provisoire étaient en service (figure 4.91). Un excès de vitesse dans le virage de la voie de sortie a été à l'origine du renversement de la remorque d'un camion-citerne dont le réservoir s'est fissuré au contact d'une dalle de béton. A cette occasion 1,9 m³ d'essence se sont répandus et infiltrés sur le bas-côté de la route.

Le lieu de l'accident se situe en bordure d'un aquifère alluvial où le toit de la nappe est à une profondeur de l'ordre de 12 m. (figure 4.92). Il a fallu tenir compte des possibilités de contamination de l'eau souterraine exploitée à quelque 400 mètres en premier lieu et par d'importants captages à 1 km. en aval.

Une heure à peine après l'accident, l'excavation du sol imprégné d'essence a été entreprise. Lors des quatre premières heures on a constaté une migration importante de l'essence dans le sol limoneux, verticalement et latéralement (figure 4.91 et 4.92). Il a fallu veiller, lors du déplacement de l'excavatrice dans la fosse, à ne pas introduire continuellement l'essence par compression dans les limons sous-jacents ; dans la suite on a mis en oeuvre des dispositifs de dragage. Après 56 heures d'intervention ininterrompue, pendant lesquelles 2 300 m³ de terres ont été écartés, les parois et le fond de la fosse ne présentaient plus aucune trace d'essence. L'opération de dépollution prit ainsi fin.

La migration de l'essence constatée lors de l'excavation était surprenante. Au droit du site se trouve, jusqu'à environ 4 m. de profondeur une couche de silt argileux (limons) avec une proportion de fines (granulométrie 0,06 mm) de près de 85 %. Sous cette couche viennent des graviers propres (figure 4.92). Alors qu'il est généralement admis que des couches limoneuses du type rencontré ici sont très peu perméables à l'eau et présentent une bonne protection contre des infiltrations polluantes, l'essence s'y est déplacé en une journée jusqu'à près de 4 m. de profondeur. En plusieurs endroits, ce milieu argileux était quasi imprégné d'essence, qui était facilement inflammable. Lors de l'opération d'excavation et de déplacement des limons imprégnés, des incendies se déclaraient souvent par combustion spontanée.

Alors que la profondeur d'infiltration était limitée à 4 m, l'excavation montra une extension latérale atteignant 35 m. (figure 4.91). De cette façon l'essence a gagné une couche de gravier servant de soubassement aux voies d'accès à l'autoroute qui étaient revêtues de macadam. Curieusement on a pu remarquer un arrêt de l'étalement de l'essence le long des chaussées bétonnées, de sorte que l'excavation n'empiéta pas sur les emplacements recouverts de dalles de béton. Sous les chaussées définitivement bétonnées, le même gravier du soubassement avait, semble-t-il, été mieux tassé et colmaté ce qui expliquerait le rôle de frontière d'extension latérale de l'essence qu'ont joué les parties de route revêtues de dalles en béton.

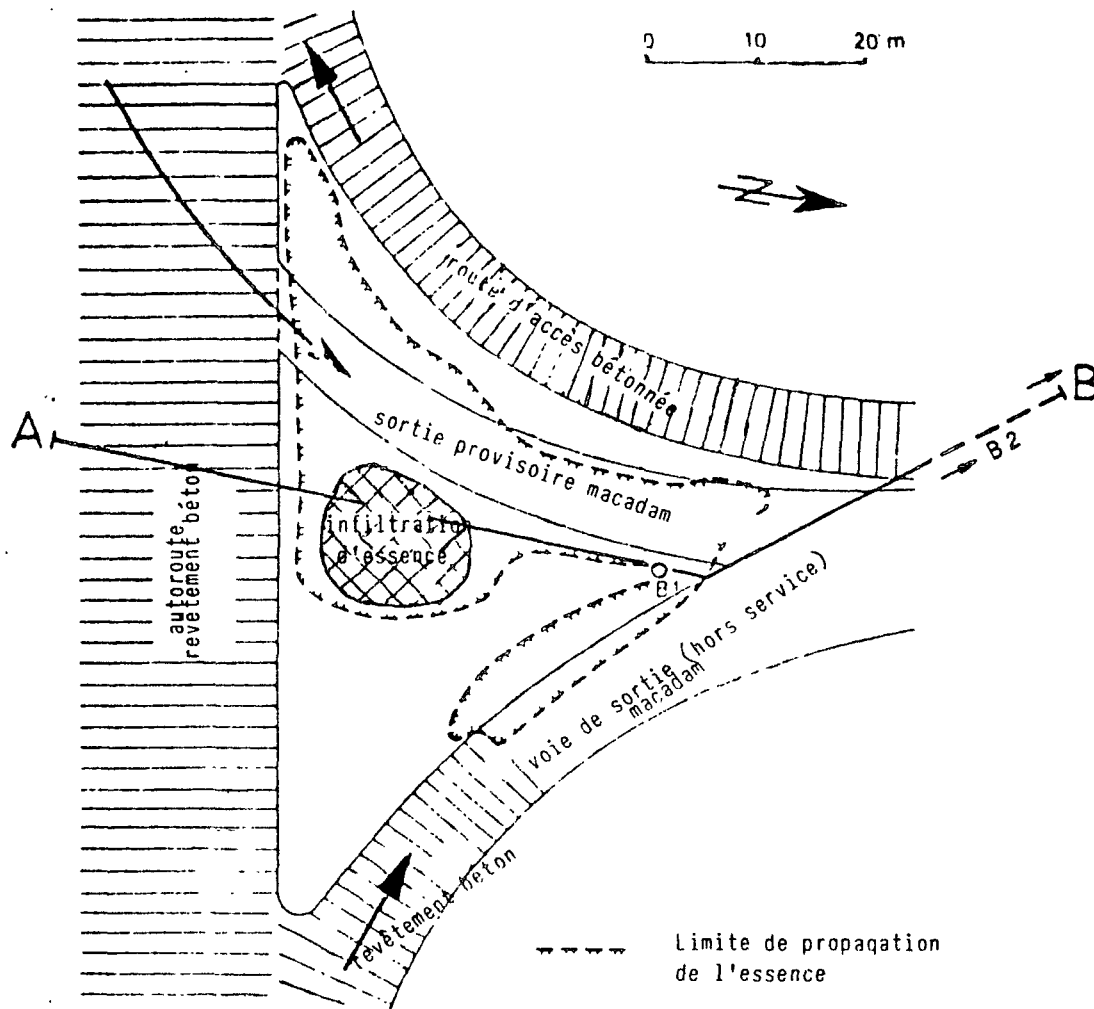


Fig. 4.91 : Cas Rheinfelden. Situation schématique

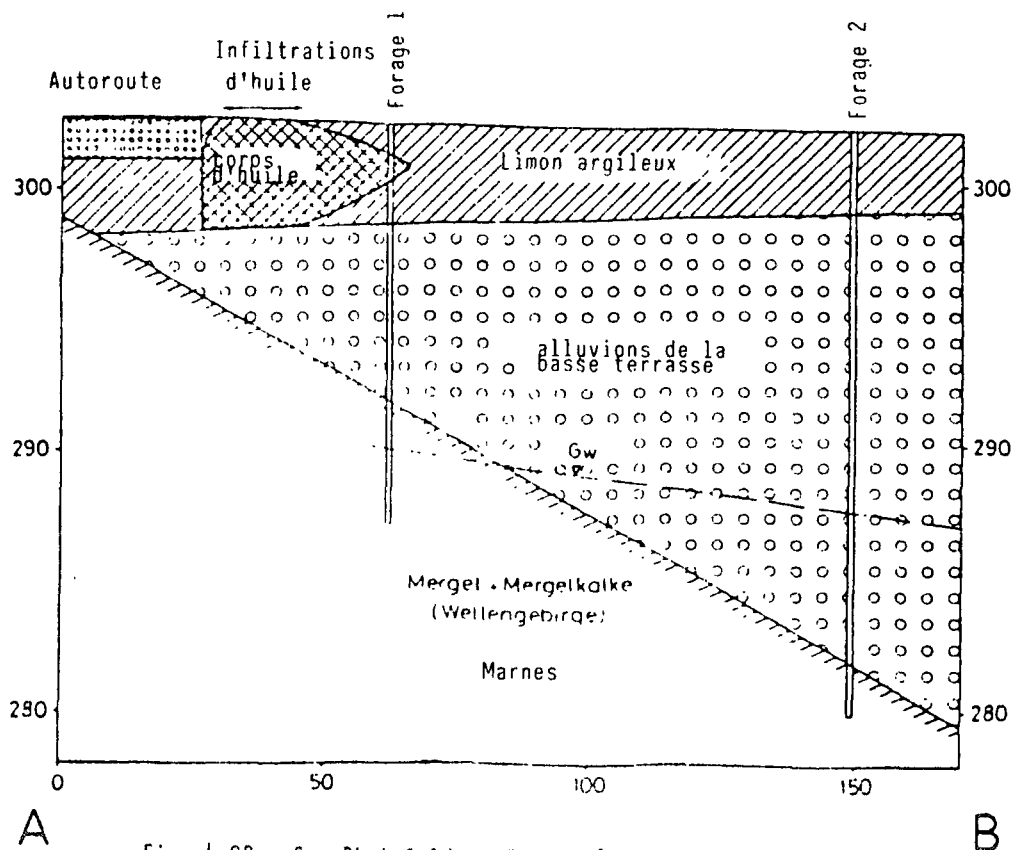


Fig. 4.92 : Cas Rheinfelden. Coupe géologique

Cas 44 : Kapfenberg sur la Mürz (Steiermark) (République Fédérale d'Allemagne)

Sur le talus en bordure de la Mürz apparurent des suintements de produits pétroliers dont la cause était restée inconnue. Par un sondage systématique de la rive et du terrain en retrait, il a été possible de délimiter une lentille d'huile surnageant au toit de la nappe d'eau souterraine ; la mesure de l'épaisseur de la couche d'huile dans les tubes de sondage a permis d'aboutir à la représentation de la figure 4.93.

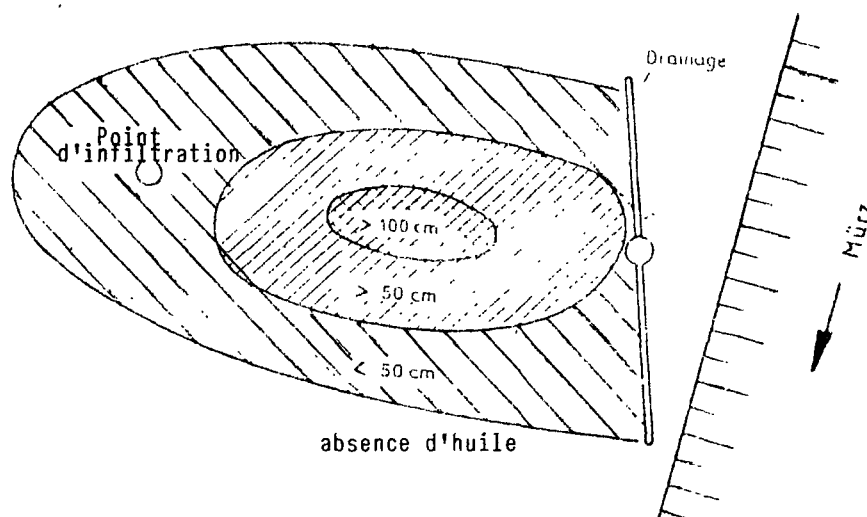


Fig. 4.93 : Cas Kapfenberg. Situation et importance de la lentille d'huile

Ainsi il a été possible de localiser sans faute le point d'infiltration de l'huile ; il s'agit des bacs de trempe d'aciers spéciaux d'un atelier de traitement. Les chromatogrammes (CPG) de l'huile du sous-sol correspondaient à ceux des huiles de traitement utilisés. Les travaux d'exploration ont également conduit à expliquer le comportement de la sortie d'huile sur la rive en liaison certaine avec les niveaux de l'eau dans la (rivière) Mürz. Un canal de décharge longeant la rive de la Mürz fit office de paroi plongeante selon le principe d'un décanteur en retenant, en période de hautes eaux, l'huile qui normalement pénétrait dans le cours d'eau.

Pour récupérer l'huile on a mis en place une tranchée de drainage en légère inclinaison par rapport à la Mürz obtenue par excavation à la profondeur de 4,5 m. et remplissage de gravier et granulat (diamètre des grains de 10 à 100 mm.) jusqu'à 1 m. en-dessous du niveau du sol. Au milieu de cette tranchée longue de 52 m. a été réalisé un puits de rabattement dont il est intéressant d'évoquer l'exécution simple dans son principe : des tuyaux d'acier d'une longueur de 1,5 m. et d'un diamètre de 2 m., disponible en grand nombre dans l'atelier, ont été assemblés par soudure et munis de fentes dans la direction axiale. D'autres tuyaux étaient posés sur ce puits pour former au-dessus du sol un réservoir d'une capacité de 4,7 m³ (cf. figure 4.94).

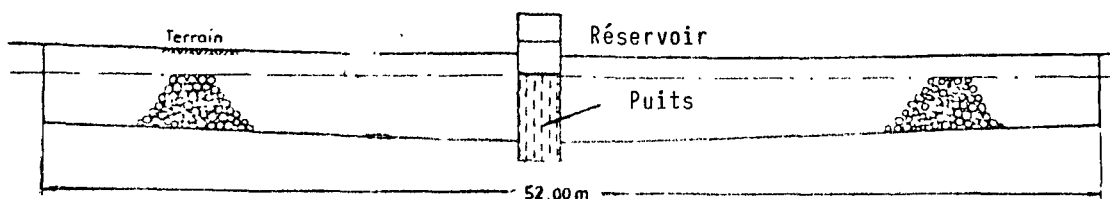


Fig. 4.94 : Cas Kapfenberg. Drainage avec puits de rabattement

Par une pompe immergée placée au fond du puits on réalise un rabattement en continu du toit de la nappe. L'eau pompée et non atteinte par l'huile est rejetée dans la Mürz. L'huile accumulée à la surface de l'eau dans le puits est aspirée au moyen d'une pompe à diaphragme et d'un flotteur vers le réservoir ou l'eau entraînée est séparée de l'huile. Celle-ci est évacuée de temps en temps hors du réservoir et l'eau décantée est remise dans le puits. La figure 4.95 montre le principe de fonctionnement du puits.

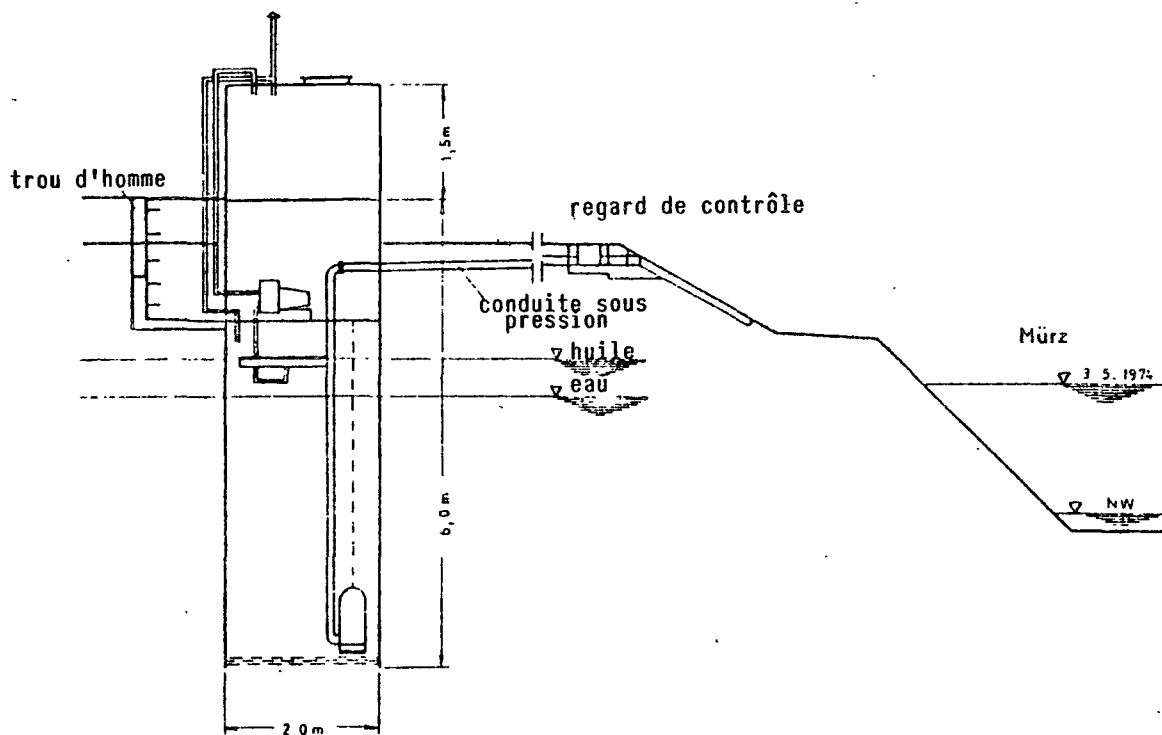


Fig. 4.95 : Cas Kapfenberg. Puits de rabattement

L'installations de récupération réalisée et mise en oeuvre avec un coût minimal s'est avérée efficace en fonctionnement continu. Le résultat au stade actuel se chiffre à plus de 800 m³ d'huile récupérée. Bien que l'on ait procédé au colmatage des bacs de trempe et de ce fait éliminé depuis un certains temps l'arrivée de nouvelles quantités d'huile, la décroissance du flux d'huile reste lente. Le fonctionnement du système en place devra de ce fait se poursuivre sur quelques années encore. Quant à la date d'origine de l'infiltration, il n'a pas été possible de la préciser ; il est fort possible qu'elle se situe vers les dernières années de guerre.

Cas 45 : Weerselo (Pays-Bas)

Lors d'un labour profond effectué en 1977 par un ouvrier agricole, une conduite de kérosène dont la présence était inconnue à cet endroit a été rompue. La conduite était alors hors service et dans l'heure qui suivait il a été procédé à la vidange. De ce fait, le volume de kérosène disparu dans le sol s'est limité à 30 m³ "seulement".

Le lieu de l'accident est situé 900 m. en amont d'un captage d'eau ($Q = 1.10^6$ m³/an) à l'intérieur du périmètre de protection rapproché (zone II ; cf. figure 4.96). La durée de transit de l'eau souterraine jusqu'au captage est évaluée à 7 ans. L'aquifère principal (sable grossier) est recouvert d'une couche de sables fins de 20 m. d'épaisseur de sorte qu'il n'existe pas de protection naturelle contre la pollution. Le toit de la nappe se situe à 2,20 m. sous le sol.

Dès le lendemain on a procédé à l'excavation de la terre contaminée à une profondeur dépassant celle du toit de la nappe ; au total 1.500 m³ déposés sur une bâche plastique en couche d'épaisseur de 10 cm. : on y ajouta des engrais tout en aérant l'ensemble. Après un temps suffisant pour aboutir à un degré de décontamination satisfaisant, le sable fut réutilisé en agriculture.

De la fosse d'excavation, le kérosène a été repompé jusqu'à épuisement des dernières traces. Avant le remblaiement, une certaine quantité de nitrate et de phosphate a été dissoute dans l'eau souterraine dans la fosse afin d'accélérer l'oxydation microbienne des restes de kérosène et des substances en solution dans l'eau.

Par l'excavation et le pompage, environ 23 m³ de kérosène ont été récupérés ; 7 m³ sont restés dans le sous-sol. Pour contrôler cette contamination on a mis en place quelques piézomètres d'observation. L'intervention rapide a permis ici d'arriver à un bon assainissement du site pollué avec des moyens relativement réduits.

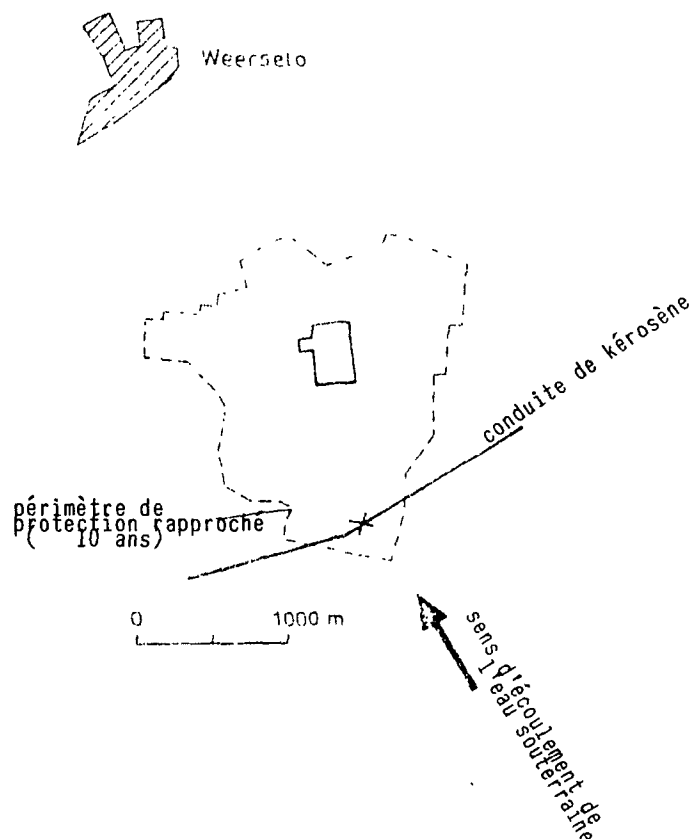


Fig. 4.96 : Cas Weerselo. Situation schématique

Cas 46 : La Haye (Pays-Bas)

Dans un jardin d'un secteur totalement urbanisé se trouve enfouie dans le sable des dunes, à près de 5 m au-dessus de l'eau souterraine, une cuve à mazout. Pour cette cuve de 15 ans d'âge on ignore si elle a subi lors de sa fabrication un essai d'étanchéité. Des contrôles, notamment avec de l'eau, n'ont jamais été réalisés.

Lors du remplissage (1977) environ 2 m³ de mazout s'échappèrent par l'orifice d'aération ; à la même époque la cuve se vidait rapidement par des perforations de sa paroi ; la quantité d'huile infiltrée dans le sous-sol se chiffre au total à 27 m³. Après un essai de charge avec de l'eau, la non-étanchéité de la cuve était mise à jour ; des trous mesurant plusieurs centimètres, provoqués par la corrosion interne, étaient visibles sur la cuve déterrée. Le volume de sol plus ou moins contaminé (30 à 35 m³ contenant de l'ordre de 20 l d'huile par m³) a été évacué vers une installation d'incinération.

Après de longues délibérations administratives, l'intervention active a enfin pu être faite. On a mis en place un puits de pompage à double effet ; par une crépine à l=12 m on pompe en continu de l'eau souterraine propre qui est rejetée dans le réseau. Surnageant au toit de la nappe, une petite pompe était mise en action (capacité max. 45 l/h). Le mélange huile-eau est acheminé vers un séparateur d'huile. Le pompage de l'huile n'est pas possible en continu.

Tout autour du puits on a mis en place 11 piézomètres d'observation (fig. 4.97) et vu le danger d'affaissement des immeubles - des points de mesure de tassement du terrain. Dans le tube 3 seul on repéra de l'huile ; ce point est situé en contrebas de la cheminée d'aération. L'étalement de l'huile est, soit de faible amplitude, soit non identifié (en direction possible vers le tube 9). D'après les mesures effectuées, les piézomètres d'observation de 1 à 4 devaient se trouver dans le cône de rabattement.

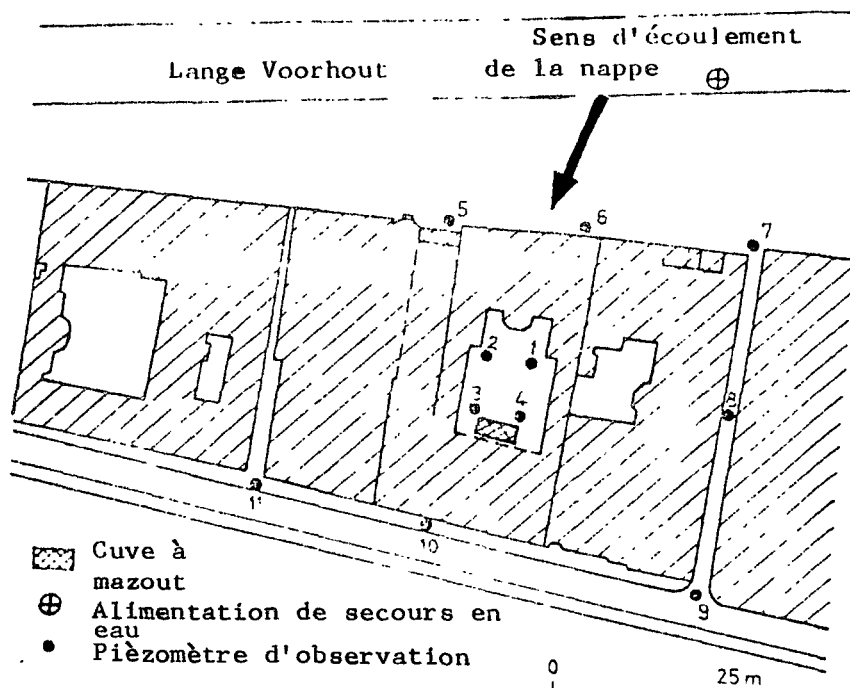


Fig.4.97 Cas La Haye. Schéma de la situation

Après une durée de 6 semaines, l'essai de dépollution a pris fin du fait que le flux d'huile était retombé pratiquement à zéro ; d'autres difficultés étaient apparues entre-temps (installation d'un nouveau réservoir etc.). La quantité repompée était de 5,5 m³ de mazout. Avec l'excavation 0,7 m³ d'huile étaient évacués. Le rendement se chiffrait ainsi à 23 %.

Une quantité importante d'huile est restée dans le sous-sol. On prend en considération la possibilité de migration de celle-ci, après quelques années, vers un étang utilisé à des fins touristiques. En amont se trouve un puits de captage d'eau potable mis en service en période de pénurie ; du fait de sa profondeur et de la situation de la crépine en -dessous d'une couche argileuse sa protection doit être assurée.

Les difficultés concernant ce cas accidentel sont à noter :

- période de réflexion trop longue et manque de coordination ;
- possibilité de disposer d'une pompe à faible capacité peu influençable par la présence de boues ;
- situation technique.

Cas 47 : Velsen I (Nord des Pays-Bas)

Début octobre 1974, dans la commune de Velsen, une fuite importante d'un réservoir enterré contenant du mazout a été détectée dans la zone de captage d'eau de l'usine élévatoire de Velsen. De la sorte 13 m³ de mazout type 1 se sont infiltrés dans le sous-sol en peu de temps.

Le réservoir, âgé d'une quinzaine d'années, avait été contrôlé sur place lors de son installation quant à son étanchéité, son isolation protectrice, sa position correcte, etc. Initialement il contenait du mazout de type 2 ; ces dernières années le mazout 1 était utilisé pour le chauffage. Dès le constat de fuite, le réservoir fut déterré. Son revêtement protecteur était sans défaut. La résistance locale du sol étant de 23.000-25.000 ohm/cm, une protection électrolytique n'était pas nécessaire. La paroi interne du réservoir présentait quelques trous d'un diamètre de 1 à 4 mm par suite de corrosion. Il semble notoire que des cuves à mazout peuvent être corrodées de l'intérieur alors que de l'extérieur toutes les précautions sont prises pour en assurer une bonne durée de vie.

Le réservoir en question fait partie d'une chaufferie centrale à mazout desservant une école communale dont la cour de récréation, sous laquelle la cuve était enterrée, jouxte la station de pompage de Velsen.

Sur la figure 4.98 est schématisée la situation de l'école et de la cuve par rapport aux puits profonds de l'usine élévatoire. La coupe géologique du site peut être décrite comme suit : jusqu'à une profondeur de 20 m une couche de sable avec lentilles d'argile et de tourbe (épaisseur 10-15 cm) ; à 20 m se situe la base de l'holocène, un horizon d'argile et de tourbe (d'une épaisseur jusqu'à 2 m) ; ensuite, une couche de sables fins et grossiers jusqu'à 70 m au moins. Les crépines des puits de captage se trouvent entre 35 et 70 m. Le débit de chacun des puits est de l'ordre de 10-15 m³/h, le prélèvement global est de 0,25 10⁶ m³/an. La cuve à mazout se situerait encore dans le cône de rabattement ; la direction moyenne d'écoulement de l'eau souterraine est vers le Nord.

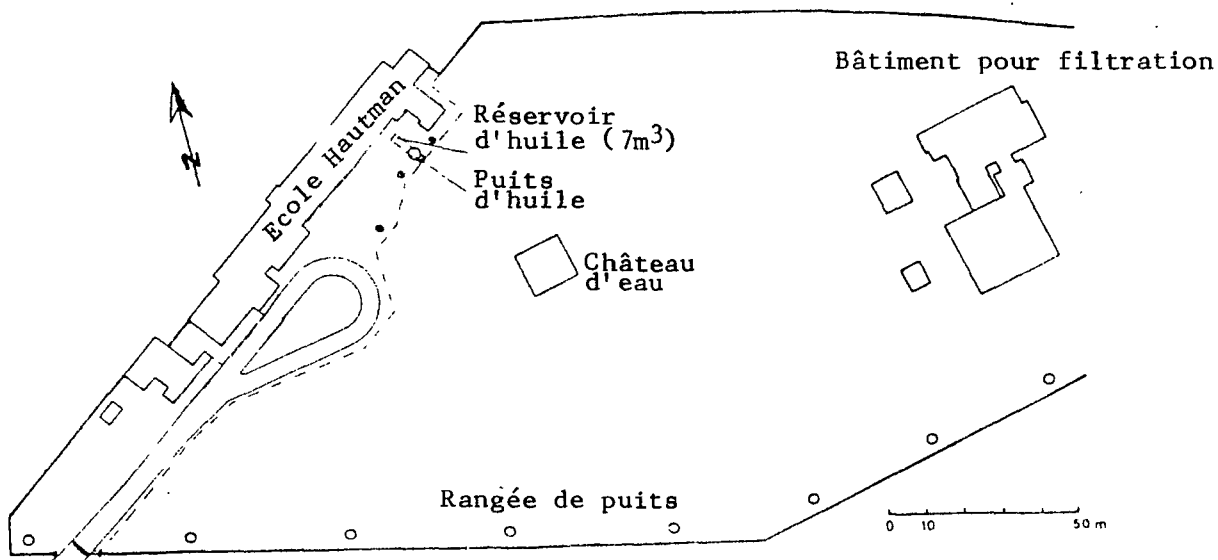


Fig. 4.98: Cas Velsen 1. Schéma de la situation

Au déterrement de la cuve, le sous-sol était imbibé de mazout. Quelque 50 m³ de sable imprégné d'huile ont immédiatement été évacués. La présence des fondations du bâtiment scolaire n'a pas permis une excavation plus importante. Des échantillons de sol ont été prélevés dans la fosse au moyen d'outils de forage. A environ 4 m + NAP se situe une couche peu perméable de sable et de tourbe, de nature marécageuse. Elle était surmontée, à cette époque, d'eau et d'une mince couche d'huile. Cette eau provenait certainement de l'essai d'étanchéité (sous pression) du réservoir. Normalement, le toit de la nappe est à environ 0,65 m + NAP. Le niveau local du sol est à 8 m 65 m + NAP. Après le constat de la fuite d'huile les 5 puits les plus proches du point d'infiltration étaient mis hors service.

Pour suivre le processus global, il a été décidé de réaliser en plein milieu de la zone de fuite d'huile, un forage jusqu'à une profondeur de 15 m et d'implanter au voisinage, à des distances échelonnées, une rangée de tubes d'observation. Au moment du forage pour la mise en place de ces tubes, on s'est aperçu de la disparition complète de l'eau présente au-dessus de la couche de nature marécageuse peu perméable ; dans ces conditions, peu de traces d'huile étaient apparentes. Dans les forages situés à 22 et à 8 m on n'a pas trouvé d'huile dans la nappe ; ceci était le cas par contre dans le forage situé à 4 m du centre de la zone de fuite.

Le forage central a été équipé d'un conduit de puits plein d'un diamètre de 250 mm suivi d'un élément crépiné de 9 m de long et de 230 mm de diamètre. Au fond du puits a été placée une pompe immergée (capacité de l'ordre de $4 \text{ m}^3/\text{h}$). L'eau souterraine pompée est exempte d'huile et évacuée vers le réseau. La pompe fonctionne en continu ; il en résulte un rabattement de la nappe d'environ 1,60 m (fig. 4.99). L'objectif était de ramener l'huile libre dans le cône de rabattement et de la récupérer dans le puits à l'aide d'une 2e pompe (du type "machine à laver"). $2,3 \text{ m}^3$ d'huile étaient repompés en l'espace de 3 mois ; régulièrement et jusqu'à la fin le débit était de $0,2 - 0,3 \text{ m}^3/\text{semaine}$. L'opération de dépollution menée avec succès a dû être arrêtée prématurément, car il n'était pas possible de protéger l'installation devant la poussée destructrice des jeunes. Les puits de captage ont été remis en service ; six ans après le début de l'accident aucune trace d'huile n'y était décelée. La présence des couches argileuses a probablement joué un rôle favorable dans ce cas.

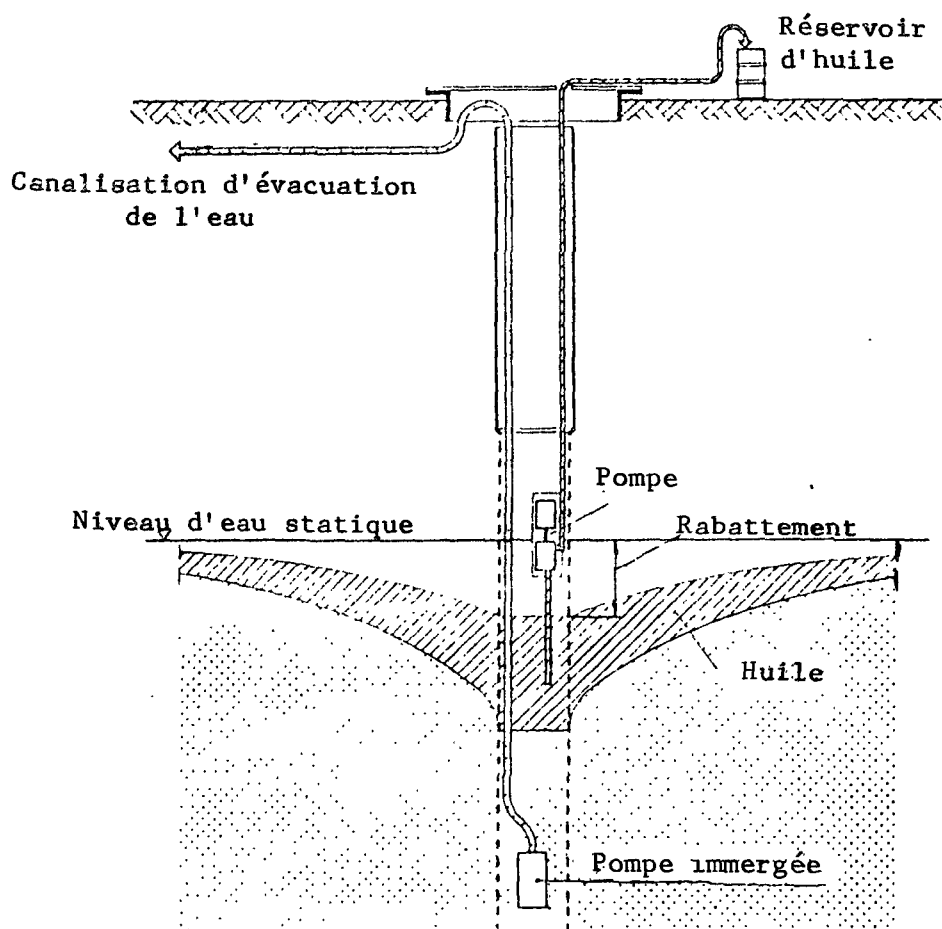


Fig. 4.99: Cas Velsen 1. Puits de récupération

Cas 48 Velsen II (Nord des Pays-Bas)

Quelques années plus tard une nouvelle fuite accidentelle s'est produite à Velsen. A côté d'un grand immeuble se trouvent une cuve à mazout de 40 m³ et une cuve à gazoil de 10 m³. Peu de temps avant l'accident, les cuves étaient déclarées en bon état lors d'une visite de contrôle. Sur le plan de l'hydrogéologie les conditions sont identiques au cas 47 (Velsen I) mais ici il n'y a pas menace immédiate sur les captages d'eau. Les difficultés résident dans le fait que les caves et fondations pénètrent à des profondeurs variables dans le sous-sol et dans la nappe. Ainsi, il n'est pas possible d'aboutir à une représentation claire de la circulation des eaux souterraines (globalement en direction du Nord) et de la propagation de l'huile. Le principe de dépollution adopté est le même que celui mis en oeuvre dans le cas Velsen I. Au stade actuel, par pompage régulier, on a pu récupérer 30 m³ d'huile, sachant qu'administrativement parlant, la perte ne se chiffrait qu'à 10 m³ au maximum. Malgré le bon déroulement de l'opération, on a l'impression que l'huile a tendance à migrer encore en direction du Nord (cf. Fig. 4.100). La mise en place de nouveaux puits "eau-huile" a été proposée.

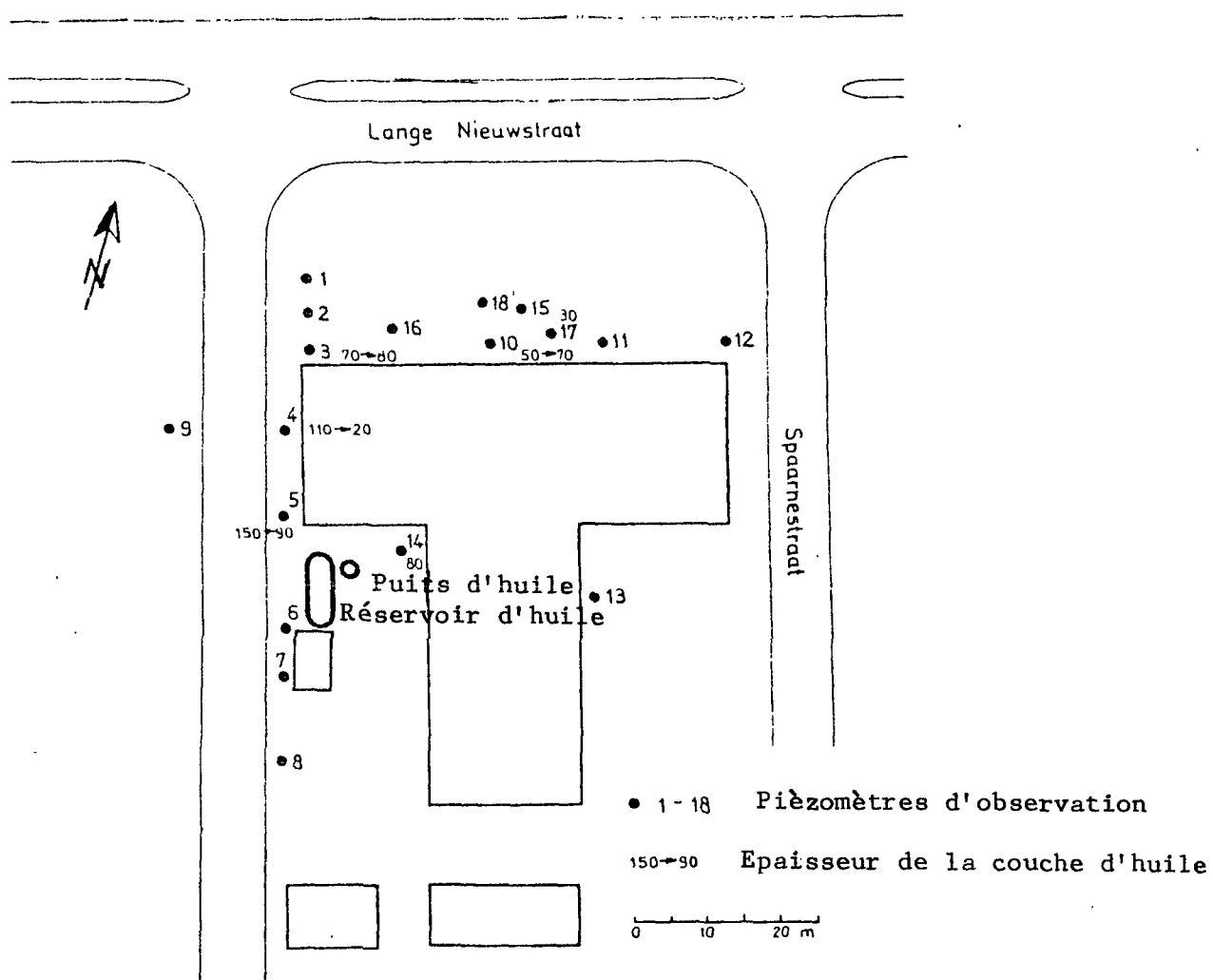


Fig. 4.100: Cas Velsen II. Situation schématique

Cas 201 : Vaihingen/Enz (Bas-pays wurtembergeois)

En creusant des fondations en été 1979, on a recoupé par hasard une galerie oubliée depuis longtemps et dont le rôle n'a pas été élucidé. L'eau s'en écoulant renfermait de l'huile, reconnue plus tard comme étant du fuel léger. Lors d'une reconnaissance fort difficile, on trouva, non seulement sur l'eau, mais aussi sur les parois et au plafond de la galerie de nombreuses masses organiques. C'était des pellicules visqueuses de bactéries, épaisses de quelques cm. Des peaux incolores se tendaient par places sur l'eau comme des peaux de tambour ; du plafond pendaient, comme des stalactites, des franges laissant s'écouler de l'huile et de l'eau. Une odeur insupportable régnait dans la galerie ; l'odeur de fuel était à peine perceptible. Vers l'intérieur, à peu près sous l'Eichendorfstrasse, les arrivées d'huile étaient les plus fortes. Les masses organiques y étaient vivement colorées ; en rouge par des oxydes de fer, en noir par des bioxydes de manganèse ; il y avait aussi des masses incolores. La galerie se termine dans un éboulement en forme de doline, dont les parois portaient encore de faibles masses organiques (fig. 4.201).

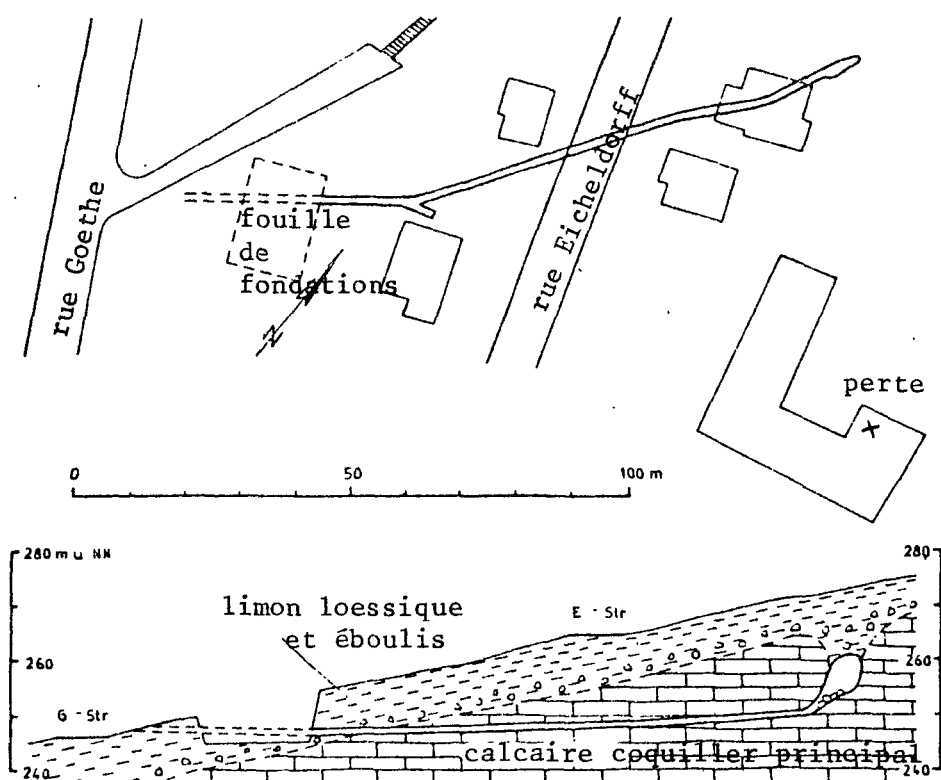


Fig. 4.201 : Cas Vaihingen/Enz. Esquisse de situation et coupe géologique le long de la galerie.

L'intensité de la dégradation des hydrocarbures par les micro-organismes montre l'ancienneté de la pollution. La cause en était probablement une grosse installation de brûlage d'huile, située environ à 65 m à l'est de la galerie. En découvrant la conduite de retour, on y trouva une place défectueuse. Un essai de coloration montra la relation directe avec la galerie.

Cas 202 : Neckarsulm (Bassin de Heilbronn)

En été 1960, après des essais de pompage poursuivis pendant 5 jours, les deux puits I et II du Rossmarkt ont été raccordés au réseau d'eau de la ville Neckarsulm (fig. 4.202). Après environ 6 semaines d'exploitation, de l'huile est apparue dans l'eau du puits I. Ce dernier fut alors mis hors service ainsi que le puits Rossmarkt II situé à environ 200 m au NNW. Les importantes recherches hydrogéologiques et chimiques ont montré que les dégâts provenaient aussi bien de la firme K.S. que de l'ancienne usine à gaz Neckarsulm. Les deux sont situés de l'autre côté du Neckar et du canal de Neckar. Les substances polluantes ont donc dû traverser les dépôts quaternaires de graviers sableux, pénétrer dans les dolomies diaclasées de la Lettenkohle et passer sous les deux cours d'eau de l'est vers l'ouest (fig. 4.203).

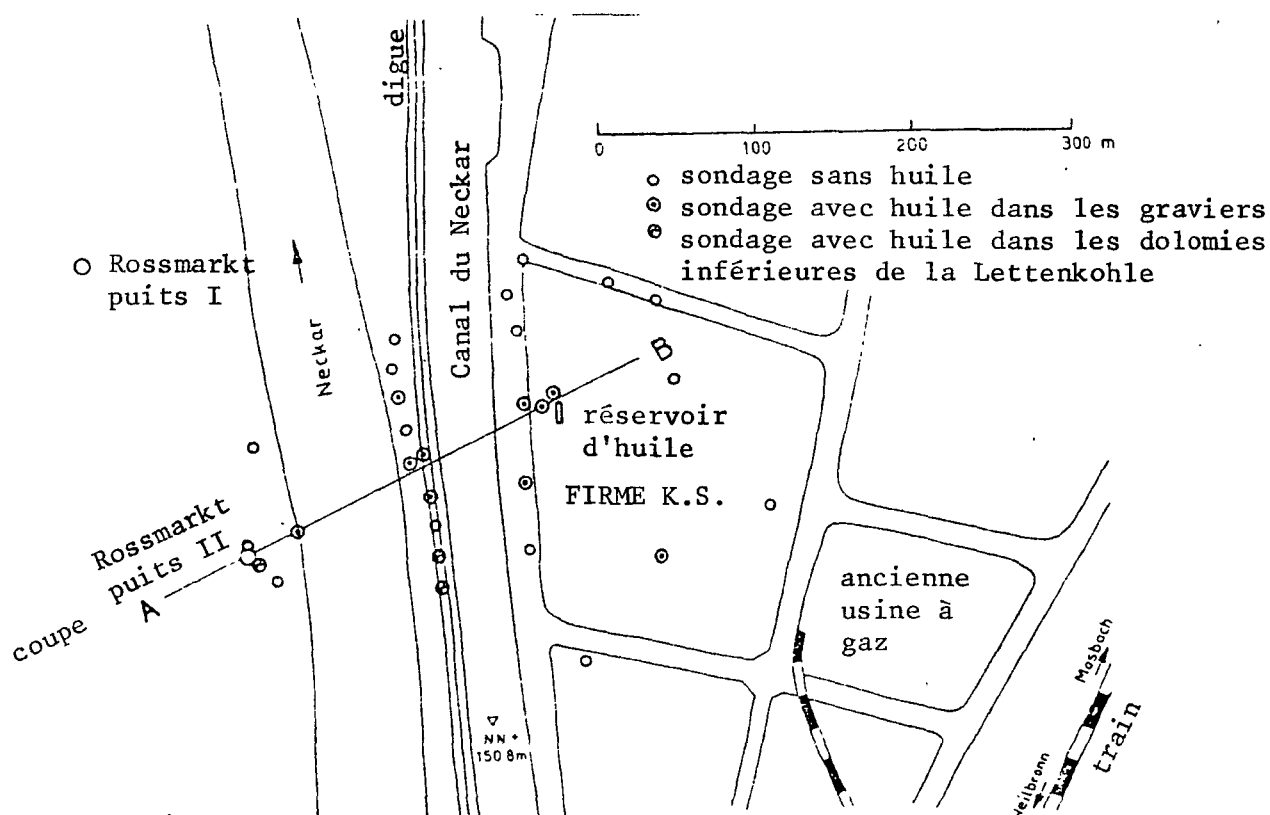


Fig. 4.202 : Cas Neckarsulm. Plan de situation.

La firme K.S. stockait de 1936-1955 des bitumes, plus tard du fuel de chauffage. Après l'apparition de la pollution dans le puits Rossmarkt I, la firme K.S. a récupéré plus de 6 m³ d'huile par des mesures de protection. Dans le terrain de l'ancienne usine à gaz, exploitée de 1905-1934, on a constaté la présence d'importantes quantités de bitume dans le sous-sol. Mais on peut admettre avec certitude que la plus grande partie des substances polluantes vient de l'aire de la firme K.S.

Au cours de l'année 1978, on a examiné les conditions permettant la remise en service des deux puits Rossmarkt. Pour cela le programme suivant fut établi :

phase 1 : pompage du puits II durant 3 mois avec des débits échelonnés de 2,5, 5,0 et 7,5 l/s

phase 2 : pompage du puits contaminé I durant 3 mois avec des débits échelonnés de 4, 8 et 12 l/s

phase 3 : pompage des deux puits ensemble comme dans les phases 1 et 2

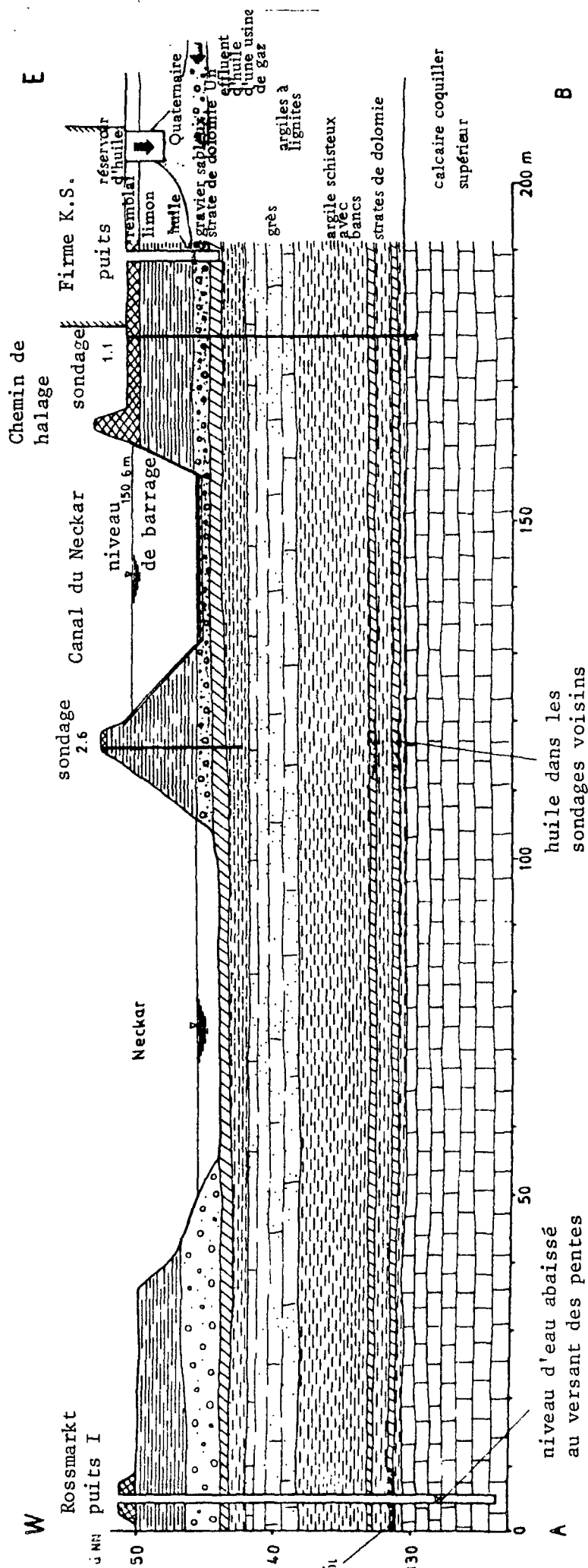


Fig. 4.203 : Cas Neckarsulm. Coupe géologique.

La phase I a été exécutée entre le 28 mars et le 11 juillet 1978. Une "crue de centenaire" a interrompu les essais de pompage du 23 mai au 12 juin. Des précipitations exceptionnelles dans la vallée de Weinsberg avec des chutes de pluie de 100 mm/2 h ont causé l'inondation et le colmatage des deux puits Rossmarkt et une interruption de près de 3 semaines. En dehors d'un léger accroissement de la dureté totale, l'eau du puits Rossmarkt II était potable durant la phase I. La teneur en hydrocarbures se situait toujours au-dessous de 0,1 mg/l.

La phase 2 s'est poursuivie du 12 juillet au 11 septembre 1978. Le 31.8, le débit a été relevé de 8 à 12 l/s. Après une semaine, des traces d'huile sont apparues brusquement dans le puits Rossmarkt II. L'odeur et le goût étaient caractéristiques du bitume.

Au cours de la phase 2, du 1 septembre au 27 novembre, on a pompé en même temps dans les deux puits. Au cours de cette phase, le puits II a toujours fourni de l'eau de bonne qualité. Toutefois, il n'a pas été exploité à plein débit à partir du 2 novembre à cause de l'abaissement de la nappe. Le débit a dû être réduit progressivement de 7,5 à 55 l/s. Dans le Rossmarkt I, après que le débit avait été relevé de 4 à 8 l/s durant une semaine, des traces d'huile ont à nouveau apparues le 9 octobre. Dans ce puits, le débit ne pouvait pas être maintenu non plus à 12 l/s, car le niveau de la nappe avait beaucoup baissé. A la fin on ne pouvait pomper que 7 l/s. Mais il y avait toujours des traces d'huile.

Les résultats des essais de pompage continu ont montré que le Rossmarkt I n'avait de l'huile minérale que lorsque le niveau de la nappe avait été abaissé d'une valeur donnée. La limite se place vers 10 m sous la margelle du puits ou vers 141,4 m NN. Ce qui correspond à un abaissement de 5 m environ sous le niveau statique et à un débit entre 7,5 et 10 l/s. On peut s'attendre qu'il n'y aura aucune perturbation si, lors de la reprise de l'exploitation de ce puits, on évite d'abaisser la nappe au-dessous de 141 m NN.

Remarquable est l'apparition de gouttelettes de bitume dans l'eau du puits Rossmarkt I sans indication d'une activité biologique. 23 ans se sont quand même écoulés depuis la dernière utilisation de bitume. Par comparaison avec d'autres pollutions par huile, cette longue durée de la non-altération de la composition du bitume est remarquable. Le bitume contient peut-être des substances nocives empêchant la dégradation microbienne.

On peut s'attendre que la remise en exploitation des deux puits entraînera un mouvement accéléré de l'eau, mettra de l'eau plus oxygénée en contact avec le bitume et déclenchera la dégradation.

Cas 203 : Kirchheim-Jesingen (Jura souabe, avant-pays)

Des venues d'huile minérale ont été constatées en avril 1976, un peu à l'aval du terrain de la firme S., dans les brèges du ruisseau Lindach, un peu au-dessus du niveau de l'eau. Un examen des 3 puits, abandonnés depuis longtemps, se trouvant à l'intérieur du terrain de la firme, a montré que 2 d'entre eux, dont le niveau d'eau était loin sous celui de la Lindach, étaient pollués par du fuel (ou diesel). Les réservoirs des environs, y compris deux de 50 m³ de la firme S., se sont montrés étanches ; aucune perte actuelle d'huile minérale dans la zone envisageable n'a pu être relevée (fig. 4.204).

Dans le puits 2, on a d'abord récupéré 200 l, plus tard encore 20 l, le long de la Lindach environ 20 l durant un temps assez long et de petites quantités seulement d'huile minérale dans le puits I.

A l'endroit des pertes, la Lindach recoupe les argilolithes du Jura noir inférieur (Lias bêta). Dans la plaine alluviale, large de 600 m, ces dernières sont recouvertes par 4,8-5,7 m de graviers holocènes, très argileux et 0,3 m de limons. Les argiles du Lias forment la base d'un aquifère, épais de quelques dm seulement, dans cette vallée. Un puits peu profond voisin fournit à la firme K. 0,3 l/s. La nappe s'écoule vers la Lindach. Les calcaires diaclasés des couches à Arietites (Jura noir alpha 3) représentent un aquifère inférieur. La surface de la nappe de cet étage se place vers 13 m sous la base des graviers (fig. 4.205).

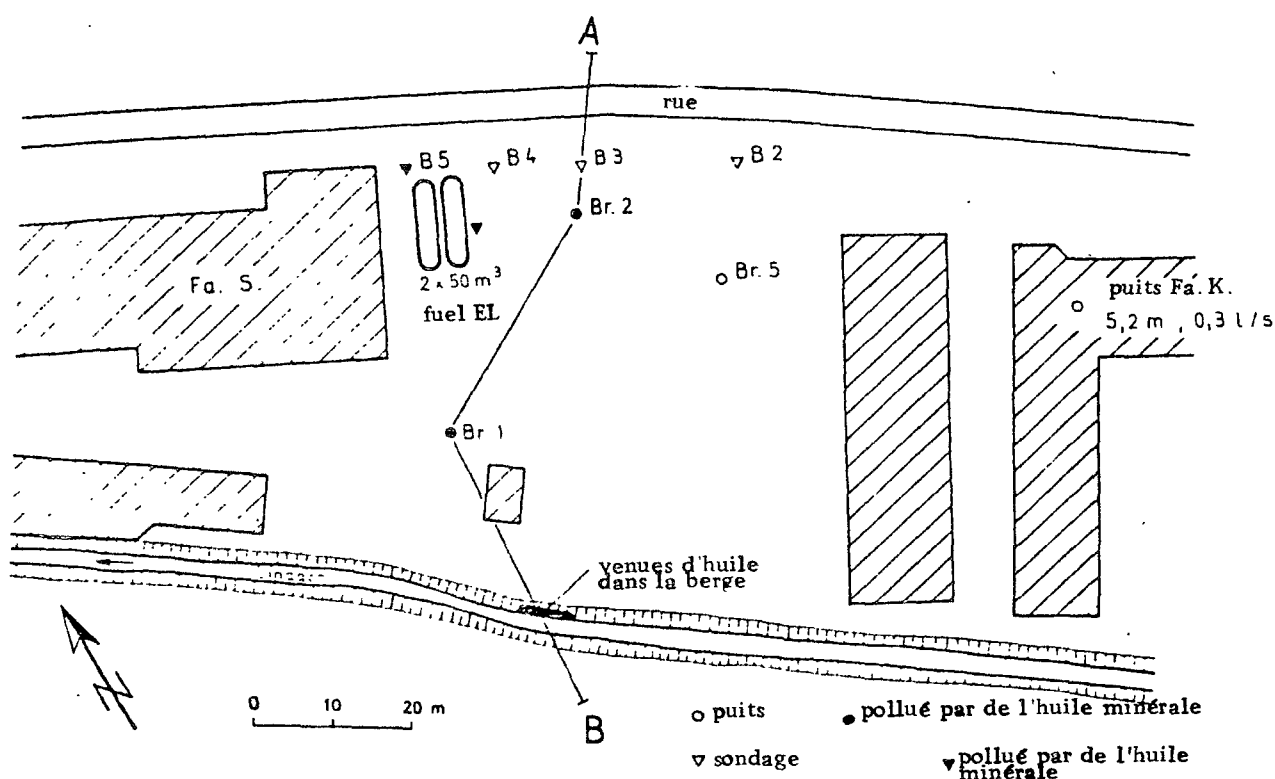


Fig. 4.204 : Cas Kirchheim-Jesingen. Esquisse de situation.

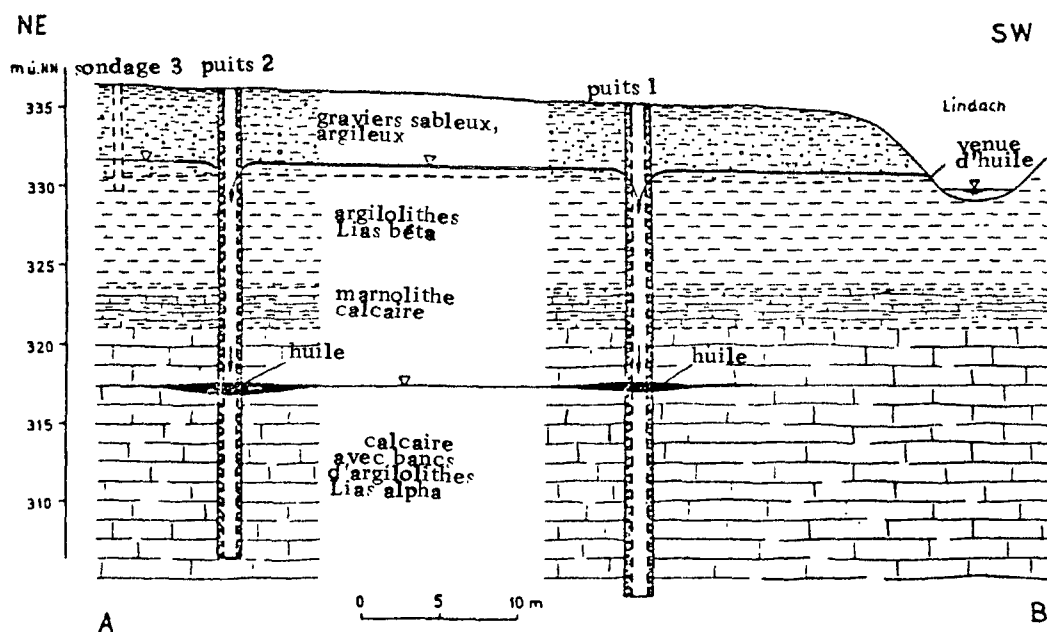


Fig. 4.205 : Cas Kirchheim-Jesingen. Coupe hydrogéologique.

Les 3 puits de la firme S. sont profonds de 25,6 à 31 m ; ils sont répinés sur toute la hauteur pour utiliser les deux étages aquifères. Les puits I et 2 jouent donc le rôle d'aspirateur dans l'étage supérieur. Dans le puits 5, la communication hydraulique avec l'étage inférieur doit être mauvaise ; le niveau d'eau y est situé dans le domaine de l'étage supérieur.

5 sondages ont permis de délimiter à peu près l'extension de la pollution d'huile dans l'étage supérieur. La pollution s'est concentrée autour des réservoirs paraissant étanches. Elle a donc dû se produire, il y a déjà quelques années, lors du remplissage de ce réservoir (fente dans le tuyau). La pénétration de l'huile dans l'étage inférieur n'était possible que par le mode d'aménagement particulier des puits. Les sorties d'huile dans la Lindach apparaissant seulement au bout de plusieurs années après les pertes sont attribuées à la baisse constante de la nappe durant un long temps au printemps 1976.

Cas 204 : Schwäbisch Gmünd (avant-pays du Jura)

En avril 1977, les dégagements de vapeur ont permis de constater la présence d'essence dans le puits de la cave d'une station de distribution et des ateliers W. Le second puits, situé de même à l'intérieur du terrain, contenait aussi de grandes quantités d'essence. Un examen des réservoirs des environs n'a pas d'abord révélé de défauts dans les installations, ni de débordements. On a d'abord soupçonné l'apport par la nappe s'écoulant du N. au S., donc à angle aigu avec la Rems. Pourtant aucune pollution ne fut constatée dans 3 puits situés à l'amont dans cette direction (puits profond B et 2 puis plus éloignés (fig. 4.206).

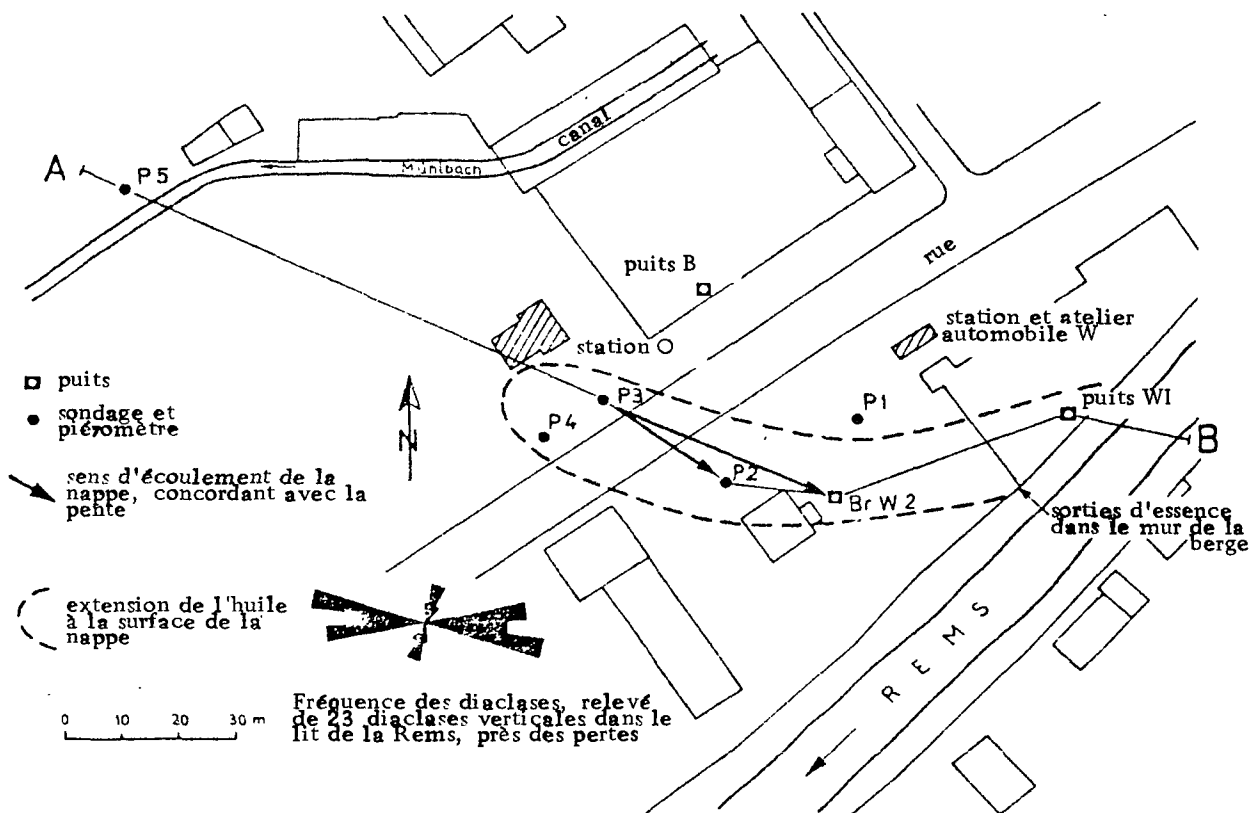


Fig. 4.206 : Cas Schwäbisch-Gmünd. Plan de situation.

5 sondages ont permis de suivre l'extension de l'essence sur la nappe jusqu'à la station de distribution O. On y a finalement découvert un défaut dans le tuyau de retour entre le distributeur et le réservoir. Un contrôle des ventes a montré en déficit de 12,4 m³ d'essence normale entre le 1.1.1976 et le 31.5.1977, correspondant à 1,9 % des ventes. Après réparation de la conduite défectueuse, les arrivées d'essence dans le puits W2 ont diminué rapidement et cessé finalement.

Les pertes se trouvent dans la plaine alluviale de la Rems. Le fleuve est entaillé jusque dans une couche de grès de la formation du "Stubensandstein". Le grès est très diaclasé ; l'eau circulant dans les diaclases est en pente vers la Rem (fig. 4.207). Des deux côtés du lit de la rivière, les grès sont couverts par des dépôts fluviaux peu épais, des graviers et des vases qui ne renferment de l'eau qu'au-delà d'une distance de 150 m de la Rems (piézomètre P5).

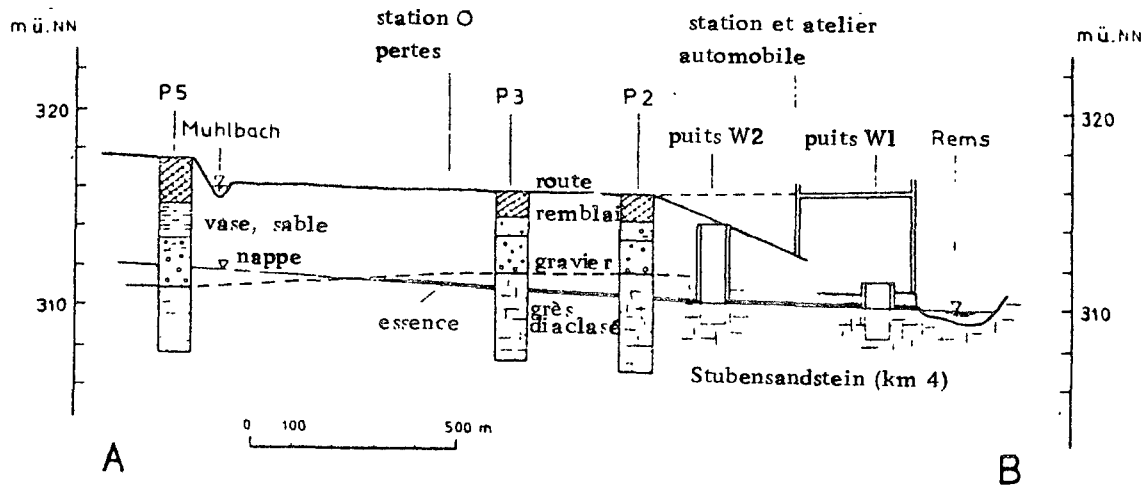


Fig. 4.207 : Cas Schwäbisch-Gmünd. Coupe hydrogéologique.

Les niveaux de l'eau dans les sondages et dans les piézomètres PI et P4 montrent une pente locale de la nappe de 12 ‰ vers l'ESE, à angle aigu vers le sens d'écoulement de la Rems. Les essais de pompage dans les piézomètres ont montré de faibles résultats mais des réactions nettes dans les points de mesure environnants (Seules les essais de pompage ont montré dans PI des teneurs sensibles à l'odeur d'hydrocarbures). Le relevé du courant dans P3 a montré un écoulement de la nappe vers P2 et vers le puits W2.

Durant plusieurs jours, on a d'abord sorti des puits W1 et W2 un mélange eau-essence, contenant environ 11 m³ d'essence d'après les calculs des pompiers. Par la suite, le niveau d'eau du puits W2 a été maintenu bas grâce à une pompe munie d'un flotteur ; l'huile a été écopée. Ceci entraîna une diminution rapide des arrivées d'huile dans le puits W1. Mais à la suite d'une défection de la pompe, de nouvelles arrivées d'huile s'y sont produites et, pour la première fois, de l'essence est sortie du mur de la berge de la Rems. La récupération, variant dans des limites étendues, d'essence dans le puits W2, a fortement régressé après la réparation de la conduite de retour de la station O vers la mi-juillet (fig. 4.208). Par la suite, il n'y avait plus de notables venues d'essence. Le total de la masse d'essence récupérée dépasse le manque constaté au distributeur O.

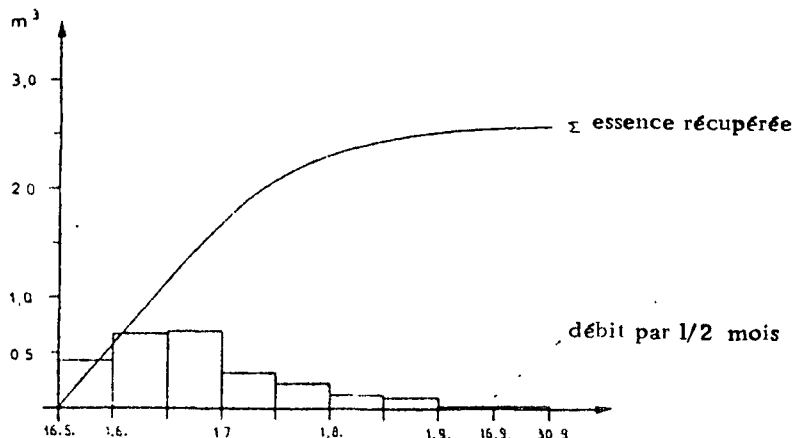


Fig. 4.208 : Cas Schwäbisch-Gmünd. Evolution de la récupération d'essence.

Les recherches hydrogéologiques dans la zone polluée ont montré un résultat inattendu un écoulement à angle aigu de la nappe vers le cours de la Rems. L'extension et l'écoulement de l'essence infiltrée près de la station 0 dans l'aquifère sont conformes aux conditions hydrogéologiques. Les diaclases verticales relevées dans le lit de la Rems ont montré que les conditions locales de la nappe et le sens d'écoulement de l'essence sont déterminés par le système dominant de la fracturation WNW-ESE (diagramme dans la fig. 4.206).

Cas 205 : Ø

Parmi les 3 puits (I-III), seul le n° II servait exclusivement à l'alimentation en eau potable jusqu'au 3 mars 1975. Dans la matinée de ce jour, ce puits commença à donner de l'eau contenant de l'essence. L'utilisation fut arrêtée et les besoins furent couverts par d'autres moyens.

A l'entour de ces puits, à 300 m de rayon, se trouvaient avant la pollution 10 dépôts d'essence dont les réservoirs contenaient I à 53 m³. L'examen de ces dépôts révéla dans presque tous une plus ou moins grande pollution du sous-sol par l'essence. La mission de surveillance technique ne put constater nulle part des défauts dans les conduites ou dans les réservoirs.

Ce n'est qu'après des analyses étendues d'air interstitiel, au SE des puits, dans un dépôt pouvant stocker 53 m³ d'essence ordinaire et de Super, que l'on a pu mettre en évidence une pollution du sous-sol dont l'importance dépassait de beaucoup celles constatées dans les autres dépôts (fig. 4.209). Dans quelques-uns des sondages alors forés on a trouvé de l'essence sous phase mobile.

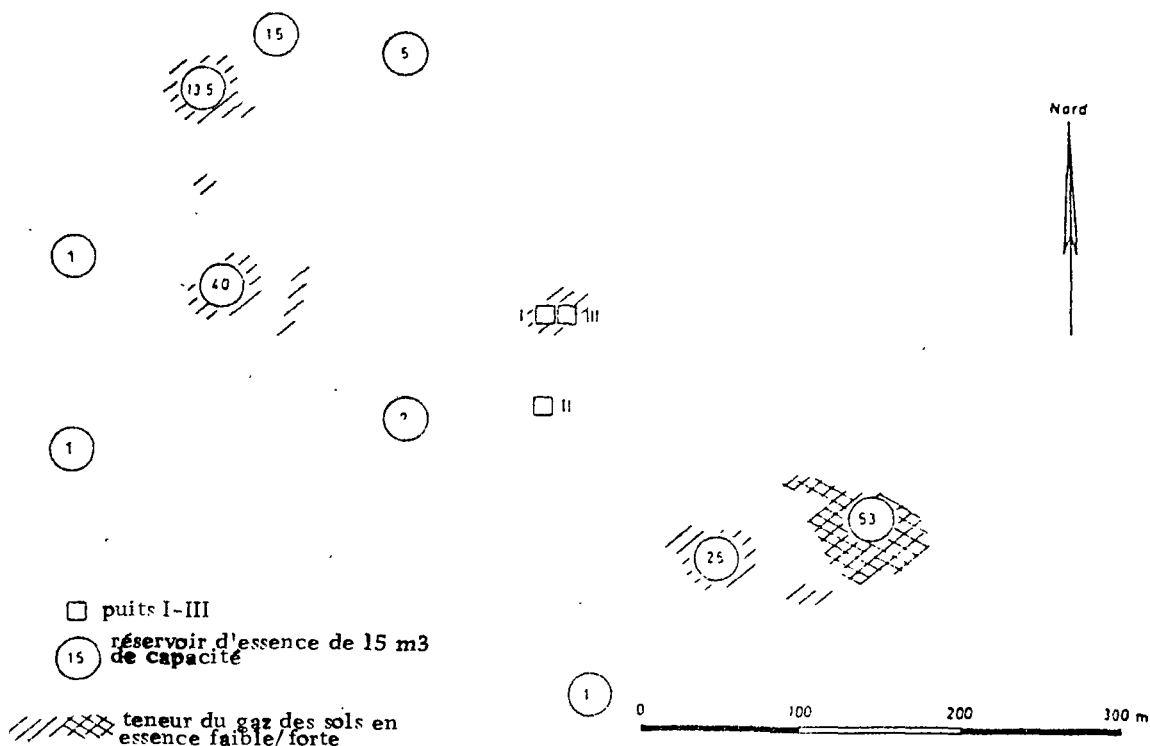


Fig. 4.209 : Cas Ø ... Esquisse de situation.

Le terrain s'incline faiblement vers le SW comme le pendage des couches. La coupe géologique (fig. 4.210) montre la structure des couches. Au-dessus du calcaire coquiller principal se trouvent 20-25 m de Lettenkohlekeuper avec plusieurs bancs de dolomie. La lettenkohle est surmontée d'environ 6 m de loess. Au bord SE de la coupe, entre la Lettenkohle et le loess, s'intercalent des dépôts très plastiques d'un remplissage de vallée. Une faille à faible rejet existe entre les sondages X et VIII.

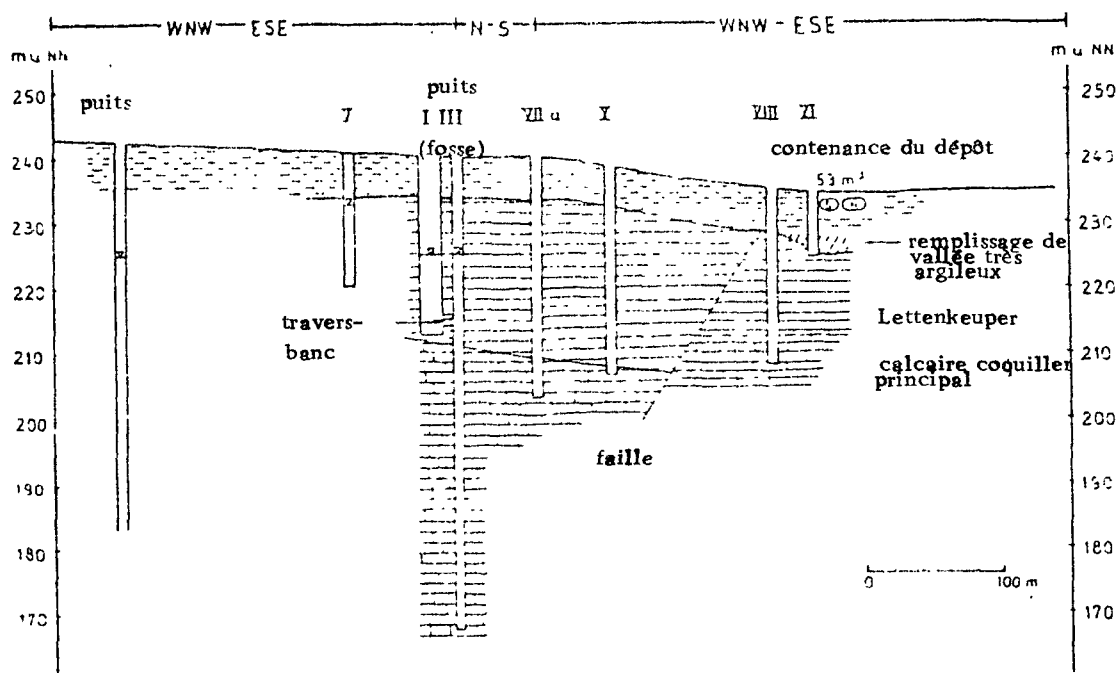


Fig. 4.210 : Cas Ö ... Coupe géologique.

Dans les puits I et III, le niveau statique de l'eau se trouve vers 226,5 m NN ; en cours d'exploitation, le niveau d'eau du puits III peut s'abaisser jusque vers 176 m NN. Il se forme alors un cône de dépression aussi bien dans la Lettenkohle que dans le calcaire coquiller principal. D'après les recherches sur les 3 puits et les 6 sondages, il est établi que l'eau du calcaire coquiller principal est sous charge et que l'essence s'est déplacée dans les bancs inférieures de la dolomie de la lettenkohle. Ce n'est qu'au voisinage immédiat des puits I et III qu'elle a pénétré dans le calcaire coquiller - ceci en raison du fort abaissement dans le puits III. La fig. 4.211 montre l'extension de la pollution vers la fin de l'année 1978. Dans les puits I et III ainsi que dans les sondages VIII, VIIa et X on a trouvé de l'essence

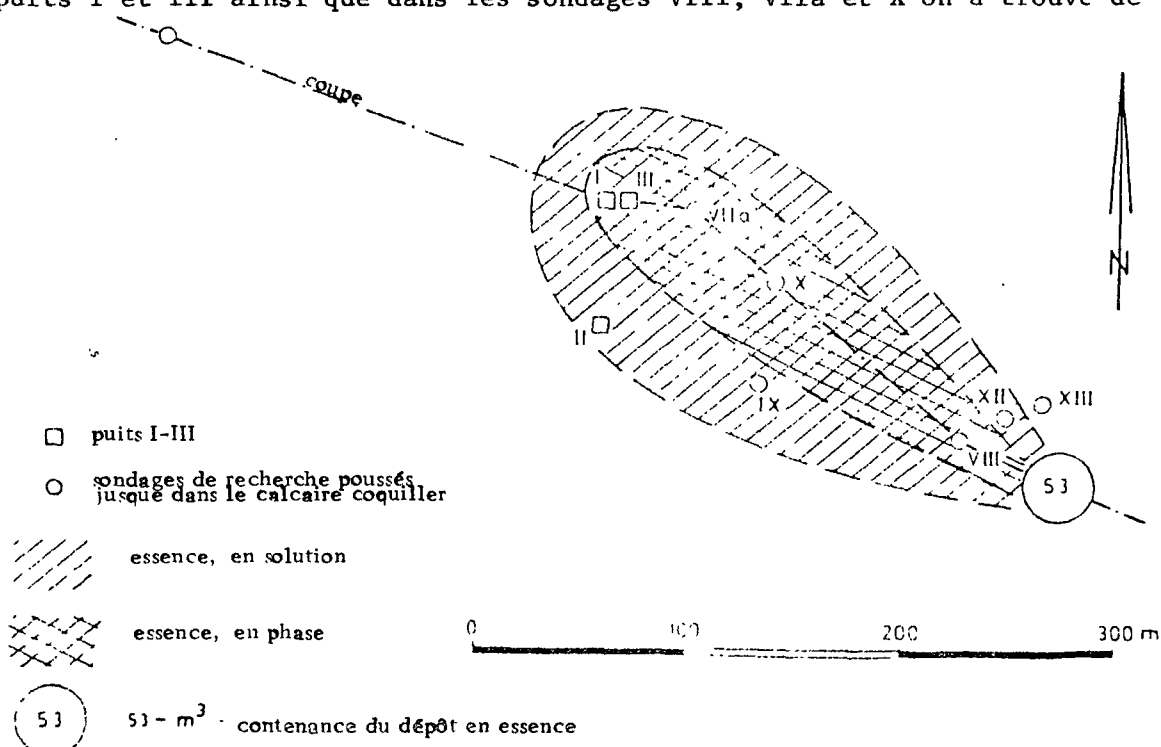


Fig. 4.211 : Cas Ö. Extension de l'essence.

en phase liquide. Dans les deux derniers sondages, l'essence s'y trouvait parfois sous une épaisseur de 3 m. Dans les sondages IX et XII on a trouvé de l'essence sous forme dissoute. Le puits II contient des produits de dégradation de l'essence, reconnaissables à l'odeur et au goût d'arômes, aux chromatogrammes gazeux anormaux, aux spectrogrammes infrarouges ainsi qu'aux floculations blanchâtres de substances organiques dans l'eau prélevée.

Après la pollution et jusqu'en mars 1978, on a sorti du puits III environ 370 000 m³ d'eau polluée par l'essence. Il y avait 5,5 m³ d'essence sous forme dissoute et 5,0 m³ en phase (au séparateur d'huile), au total environ 10,5 m³. Comme mesure supplémentaire, on a foré en mai 1979 4 autres sondages alignés en direction SSW du sondage XII. On n'a trouvé de l'huile que dans le sondage le plus au sud, n° XVII, sous forme de phase essence. Les 3 autres sondages n'ont montré que des particules dissoutes d'essence dans l'eau. Ils n'ont sans doute pas recoupé de diaclases dans le lettenkeuper inférieur, mais seulement dans le calcaire coquiller sous-jacent. Le sondage XVII avait de bons résultats comme puits de protection.

Cas 206 : Bad Ems (massif schisteux rhénan)

Du fuel léger était apparu dans quelques diaclases étroites d'une caverne creusée dans les grauwackes et les schistes argileux du Dévonien inférieur. On craignait que cette huile pouvait être la manifestation limite d'une importante pollution, située loin dans les montagnes. Par mesure de précaution on a examiné le réservoir enterré d'une maison située 60 à 80 m plus haut dans la pente. En effet, environ 0,5 à 1,0 m³ de fuel s'y étaient visés (fig. 4.212).

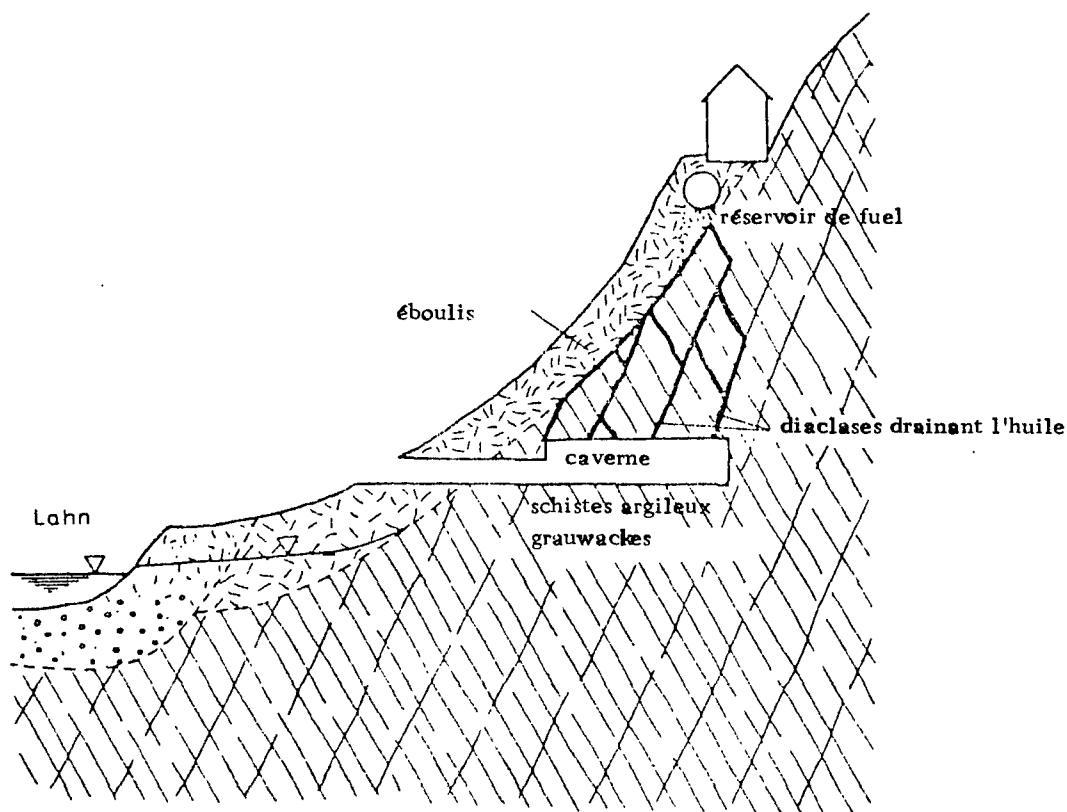


Fig. 4.212 : Cas Bad Ems. Coupe géologique (hors échelle)

Bien que le réservoir était enterré dans les éboulis, l'huile a pu cheminer à la limite des éboulis et du sol en place, s'infiltrer dans les diaclases parallèles à la pente et descendre jusque dans la caverne. L'expérience montre que les diaclases dans les schistes sont en général colmâtées à l'intérieur des montagnes, mais elles sont souvent ouvertes au voisinage des pentes, ceci à cause de l'absence de contre-pression du côté de l'air libre.

Cas 207 : Munstertal (Franconie)

Un camion citerne s'est renversé sur une route de montagne ; environ 10 m³ de fuel EL se sont déversés dans le fossé dans la pente. Environ 8 m³ se sont rapidement infiltrés dans les calcaires diaclasés et en partie karstifiés du calcaire coquiller inférieur. En enlevant le sol imprégné d'huile sur les lieux de l'accident, on a récupéré environ 2 m³ d'huile. La situation était exceptionnellement critique dans ce cas car le lieu des pertes n'est éloigné que de 400 à 600 m des captages, fournissant jusqu'à 220 l/s à une commune et qu'il est situé dans le bassin d'alimentation de ces puits.

Comme le montre la coupe géologique de la fig. 4.213, le calcaire coquiller inférieur aquifère est abaissé en fosse et déformé tectoniquement. Les argilolithes sous-jacentes du Röt forment la base de l'aquifère. Le fossé forme donc le réservoir où s'accumulent les eaux karstiques des pentes voisines.

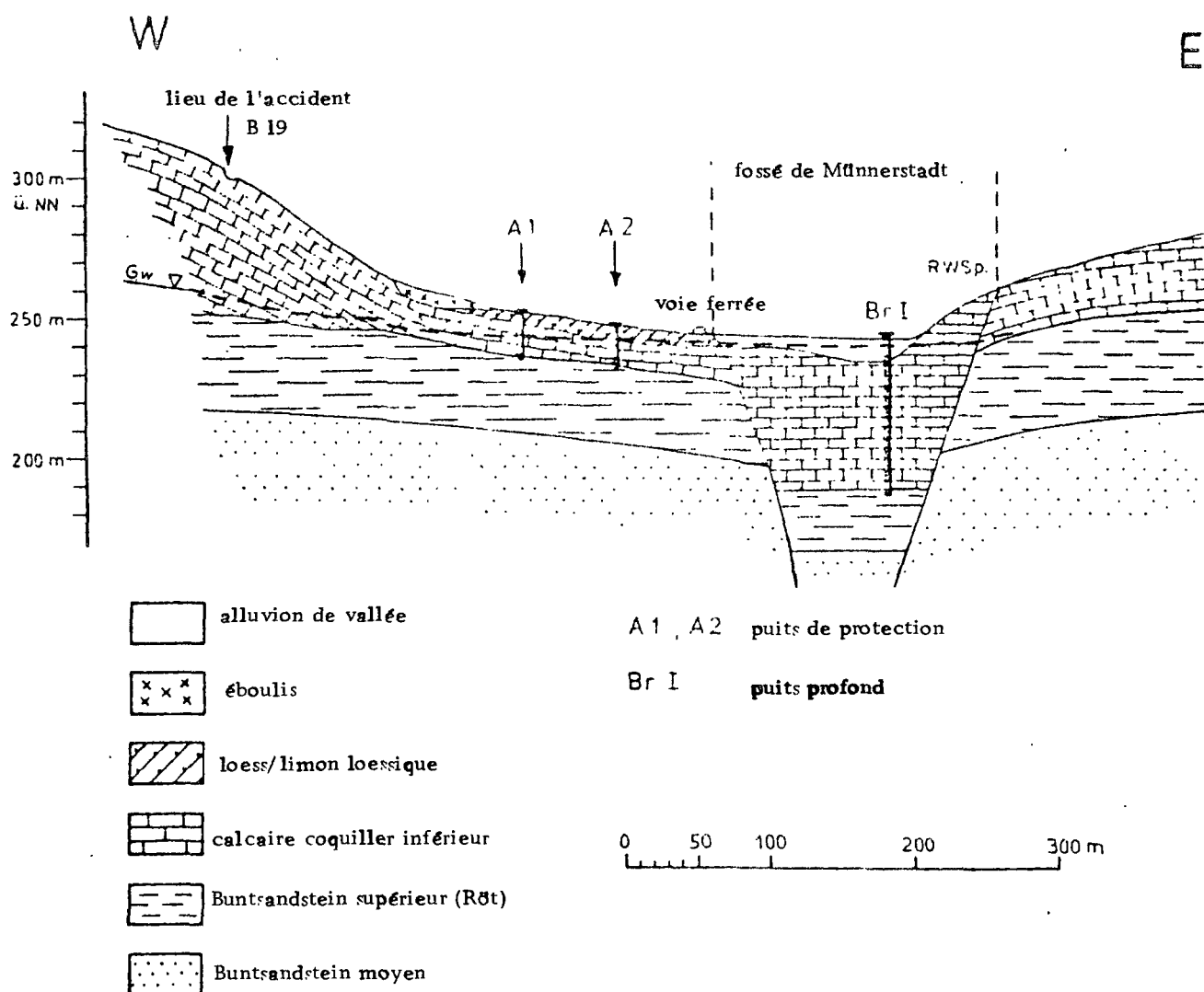


Fig. 4.213 : Cas Münnerstadt. Coupe géologique.

En raison des conditions extrêmement défavorables, il fallait envisager une pollution des puits placés à l'aval dans le sens d'écoulement de la nappe venant des pertes. Par mesure de précaution, le puits le plus proche fut mis hors service et 2 puits de protection furent creusés entre le lieu des pertes et les captages. Ces deux puits ont fonctionné durant 20 jours avec des abaissements de la nappe de 12 à 25 m. On a été surpris de ne trouver que dans l'un des puits des traces d'huile durant un court laps de temps. Au cours des 4 années suivantes, aucune autre trace d'huile n'a été relevée.

Il est vraisemblable que l'huile, ayant filtré jusqu'à la surface de la nappe, a été empêché de s'étendre par des écrans imperméables. La surface de contact huile/eau doit être réduite, car l'analyse IR de l'eau des puits n'a révélé aucun accroissement sensible des substances lipophiles par rapport aux teneurs de fond. L'analyse organoleptique n'a fait constater aucune pollution. Mais on ne peut exclure une menace latente à l'occasion de niveaux extrêmes de la nappe. Cet exemple montre nettement combien l'extension de l'huile dans un aquifère karstique est imprévisible.

Cas 208 : Nordhalben (Franconie)

A la suite d'un défaut dans la conduite de retour d'un réservoir, environ 4,5 m³ de fuel EL se sont infiltrés sans doute durant un assez long laps de temps. Sous le réservoir affleurent des grauweekes et des schistes paléozoïques. La surface de la nappe continue, pour autant qu'elle existe, ne doit se trouver qu'à une certaine profondeur. On a donc renoncé à des travaux de terrassement et à la construction de puits de protection. Etant donné la situation hydrogéologique, ces travaux auraient sans doute coûté cher, sans être très efficaces.

A une distance d'environ 400 m des pertes et environ 30 m plus bas, en bordure du fond de la vallée, sourd une source, dans laquelle est apparu du fuel. Grâce à un barrage, établi un peu en aval de la source, la plus grande partie de l'huile fut récupérée. Après deux mois environ, aucune huile ne pouvait plus être décelée organoleptiquement. La fig. 4.214 montre une coupe géologique par les pertes et la source.

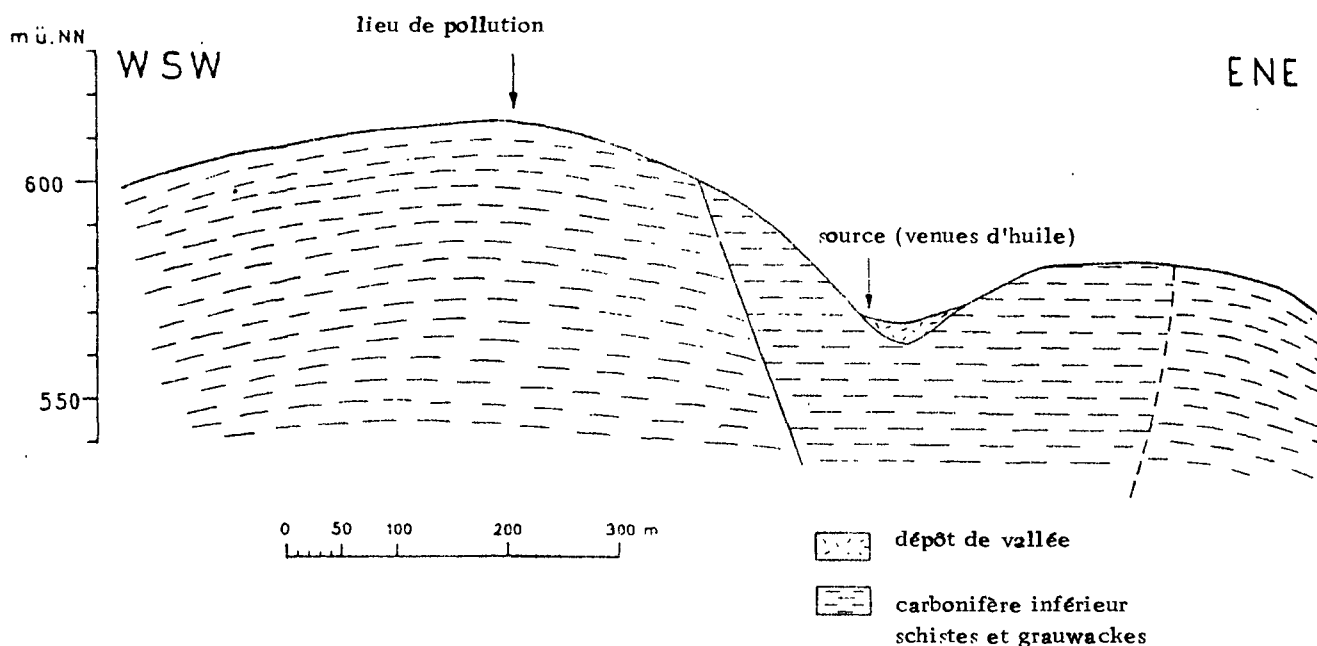


Fig. 4.214 : Cas Nordhalben. Coupe géologique.

Les schistes et les grauweekes sont des roches en général compactes et peu fracturées, dont les strates s'inclinent ici à peu près à angle droit contre la direction d'écoulement de l'huile. Il est vraisemblable que l'huile s'est déplacée dans la partie meuble du sol en suivant le relief. Le pouvoir de rétention de telles roches étant très faible, on comprend que l'eau de la source ne contenait plus d'huile après un temps aussi court. Par différence avec le cas Bochum I, on n'a pas constaté de traces d'huile plus tard par analyse organoleptique.

Cas 209 : Bochum I (Ruhr)

Lors du remplissage d'un réservoir placé dans un garage, à cause d'un défaut, environ 3 m³ de fuel se sont infiltrés dans le sol. Peu de temps après la découverte des pertes, de grosses gouttes d'huile apparurent dans une source située à environ 100 m au bas de la pente et formaient un film épais de 1 mm à la surface du ruisseau alimenté par la source (fig. 4.215). 2 km plus loin, le ruisseau traverse un terrain d'alimentation en eau avec bassin de filtration dans la vallée de la Ruhr.

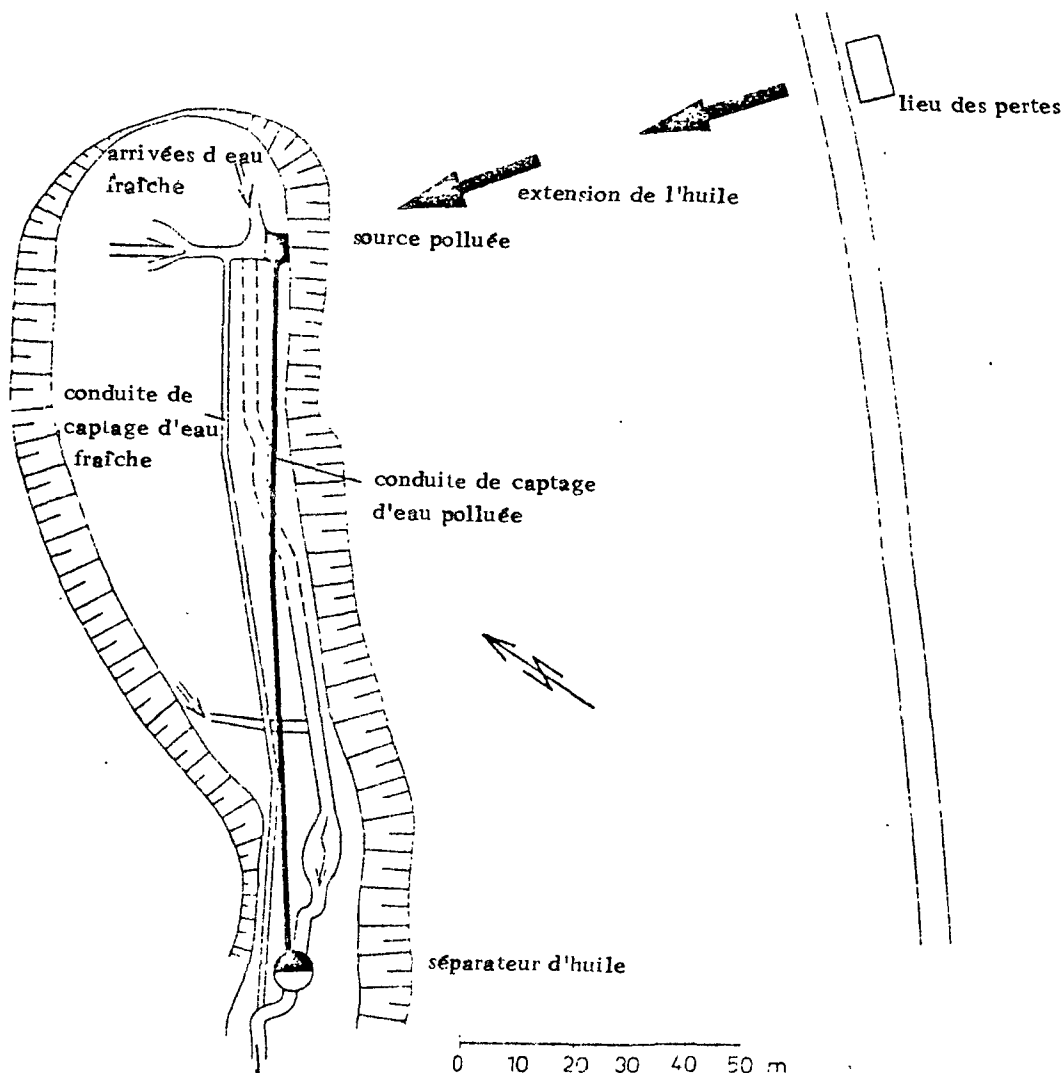


Fig. 4.215 : Cas Bochum I. Plan de situation.

L'accident s'est produit dans le domaine d'une série verticale de schistes et de grès du carbonifère supérieur, recouverte par une couche de limons loessiques épaisse de près de 2,50 m. Les roches carbonifères sont très altérées et ameublies en surface. Cette zone d'altération, due à une action climatique préquaternaire, (appelée aussi Hoddellzone), s'étend jusqu'à quelques mètres dans le sous-sol et s'adapte à la géomorphologie. Cette Hoddellzone est le lieu de circulation préférentielle des eaux d'infiltration et donc aussi pour l'huile infiltrée (fig. 4.216).

Pour reconnaître le lieu des infiltrations d'huile, on a creusé un fossé à l'endroit des pertes. La présence d'une couche de limons loessiques fut confirmée. On sait que les limons loessiques sont peu perméables à l'huile. Dans le cas présent, l'infiltration rapide de l'huile était le fait, qu'en enlevant une souche d'arbre, on avait créé un trou, rempli de terrain meuble et non étanchéifié. Grâce à ce trou dans la couche de limons, l'huile pouvait arriver dans la "Hoddellzone" après un court trajet (fig. 4.217).

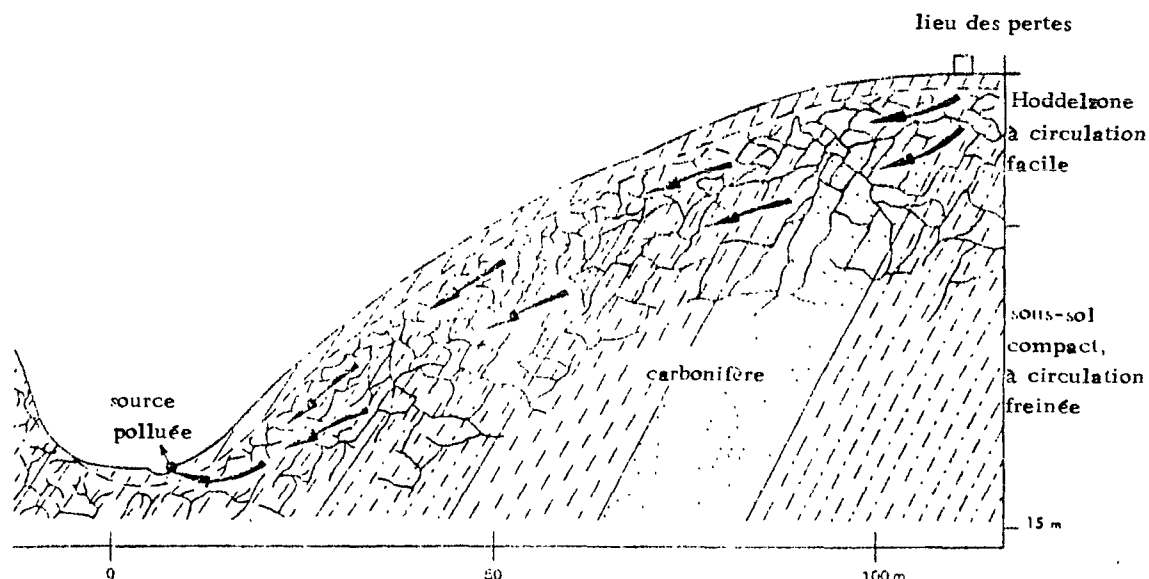


Fig. 4.216 : Cas Bochum I. Coupe verticale schématique montrant l'extension de l'huile dans la "Hoddelzone".

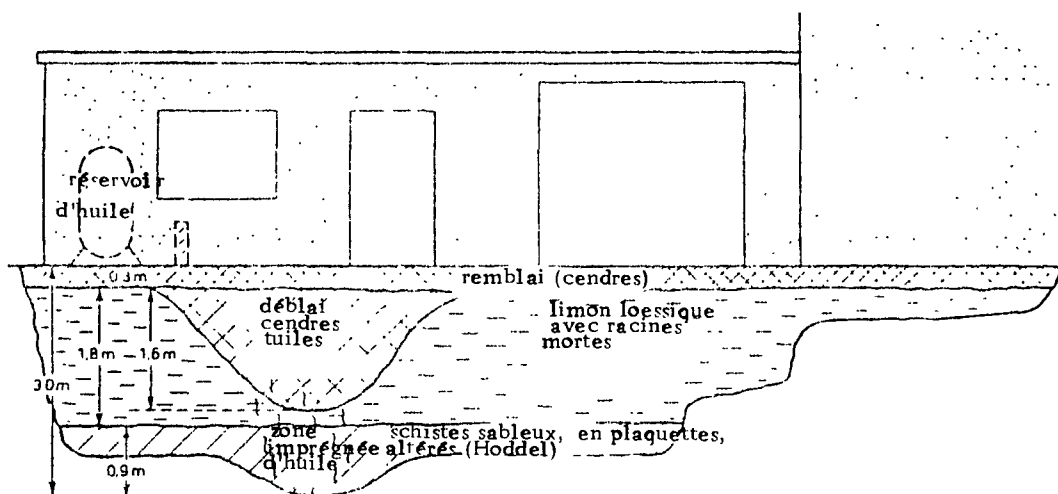


Fig. 4.217 : Cas Bochum I. Point d'infiltration fossé de reconnaissance (coupe verticale).

Pour décider si d'autres cheminements pouvaient entrer en ligne de compte pour l'huile, on a déversé dans la fosse creusée près des pertes 6 m³ d'eau avec 2 kg d'uranine. Après 4 1/2 heure déjà, le colorant apparût dans la source polluée. On n'a constaté aucune autre sortie de colorant, ni le long du ruisseau, ni dans la montagne. A cause l'altération profonde de la "Hoddelzone" et de la forte pente, l'huile a pu s'écouler rapidement et sans s'arrêter vers la source.

Après la constatation du déplacement en ligne directe de l'huile entre le lieu des pertes et la source, les mesures d'assainissement étaient relativement simples. Le ruisseau fut capté un peu à l'aval des venues d'huile et conduit sur un séparateur d'huile. Les apports non contaminés du ruisseau furent déviés et remis dans le ruisseau un peu à l'aval du séparateur d'huile (fig. 4.215). La plus grande partie de l'huile est sans doute arrivée dans le ruisseau au bout de peu d'heures. La construction d'un barrage d'huile a dû empêcher la pénétration de l'huile dans le terrain d'alimentation des captages d'eau de la vallée de la Ruhr. Dans le séparateur d'huile installé seulement 7 jours après les pertes, on a recueilli au début encore 1-2 l/h d'huile, plus tard moins de 0,02 i/h.

Il est remarquable que, malgré la rapide évacuation de la majeure partie de l'huile au début de la pollution, deux ans plus tard de l'huile sortait encore du sol. A l'époque des fortes précipitations au cours des mois d'hiver, on observait une teneur plus élevée de l'eau du ruisseau en huile.

Cas 210 : Bochum II (Ruhr)

2 à 3 m³ (probablement) d'essence s'étaient écoulés d'un réservoir défectueux et s'étaient infiltrés dans le sous-sol. Les pertes se trouvent dans la zone d'alimentation du puits d'une brasserie, on a organisé des recherches pour délimiter l'extension de l'essence (fig. 4.218 et fig. 4.219). L'aquifère est formé par les marnolites du crétacé (marnes à labiatus), qui sont ici assez diaclasées. Les marnes sont recouvertes par des sables vaseux (loess). Sous le fond de la cuve à réservoirs, l'épaisseur du loess atteint encore 1,40 m. Les sondages ont montré que l'essence avait traversé le loess et s'était infiltré dans les marnolites.

2 mois après le début de la pollution, deux puits EI et E2 ont été creusés entre les pertes et le puits de l'usine ; EI montrait tout de suite une forte odeur d'essence. E2, d'abord sans essence, en montrait aussi 2 mois plus tard. Par chromatographie gazeuse, le pompage à faible débit révéla dans le puits EI au début 30 mg/l, plus tard encore 10 à 5 mg/l de composants d'essence, dans E2 environ 5 mg/l et dans le puits de l'usine des traces seulement 9 mois après le début de l'incident et pour un temps court. Dans le sondage Kb 76 au SW des pertes, des composants d'essence apparaissaient d'abord à l'état de traces plus tard en concentrations atteignant jusqu'à 5 mg/l. Dans le cours souterrain des pertes, la pollution par l'essence au travers du sens d'écoulement de la nappe, s'étendait sur plus de 120 m. Dans les échantillons prélevés, l'essence ne se présentait jamais en phase, mais seulement sous forme dissoute. Sous cette forme l'extension de l'essence ne rencontrait aucun obstacle. On pouvait espérer ici que par lessivage, évaporation et dégradation microbienne, la pollution aurait régressé dans un temps limité suffisamment pour pouvoir renoncer à prendre des mesures spéciales d'assainissement. Comme mesure d'assainissement, on ne pouvait envisager que la création d'un puits d'écopage qui aurait prélevé l'eau du puits de l'usine et donc entraîné des pertes pour celles-ci.

Cas 211 : Essen, centre de la ville (Ruhr)

Un pompage de contrôle de débit fut exécuté début 1971 dans un des puits de captage d'eau industrielle du centre d'Essen. La pompe fournissait d'abord de l'eau claire. Mais quand l'abaissement de la nappe atteignant à peu près le niveau des venues aux pompes, ces dernières ne donnaient plus que de l'huile pure, profondément teintée en brun foncé.

Pour connaître le polluant, il devint nécessaire d'examiner l'état de tous les dépôts de réservoirs des environs du puits. Il en résulta que des fuites existaient dans un dépôt situé à environ 150 m du puits (2 réservoirs enterrés de 20 m³ de capacité chacun) (fig. 4.220). Une quantité inconnue de fuel EL s'était écoulée par des trous de 1-2 cm. Le début des pertes ne pouvait plus être déterminé.

Sur le lieu des pertes, 20-30 m de marnes calcaires et sableuses du crétacé supérieur sont couvertes d'une faible couche de vase et sables fins quaternaires. Les marnes diaclasées (Turonien) renferment une nappe utilisée pour les besoins industriels et aussi pour compléter l'alimentation en eau potable en cas de besoin. L'eau de la nappe s'écoule vers le Nord, sensiblement en direction du puits pollué. Le volume de la pollution était d'abord inconnu ; on pouvait craindre la pollution d'autres puits par le cours souterrain des pertes.

Pour fixer l'extension de l'huile, on forà à 30 m des pertes en direction de l'écoulement de la nappe, le sondage PI.A. la profondeur de 6,80 m, il trouva de l'huile, 20 cm environ, sur la nappe. Les recherches à 40 m de distance à l'W et à l'E n'ont pas trouvé d'huile. On n'en trouva pas non plus dans 2 autres sondages, placés à 70 m des pertes dans le sens d'écoulement de la nappe.

Pour connaître les conditions dans le courant souterrain du puits pollué, on disposa des sondages et des piézomètres placés le long d'un métré, un peu au N du puits. Aucun des points de mesure ne révéla des quantités appréciables d'huile ou d'hydrocarbures dissous. Les recherches ultérieures ont montré que plus au N, à l'aval du sens d'écoulement de la nappe, les marnes diaclasées crétacées avaient été enlevées sur 15 m et remplacées par des sédiments de vase et de sable fin (fig. 4.221).

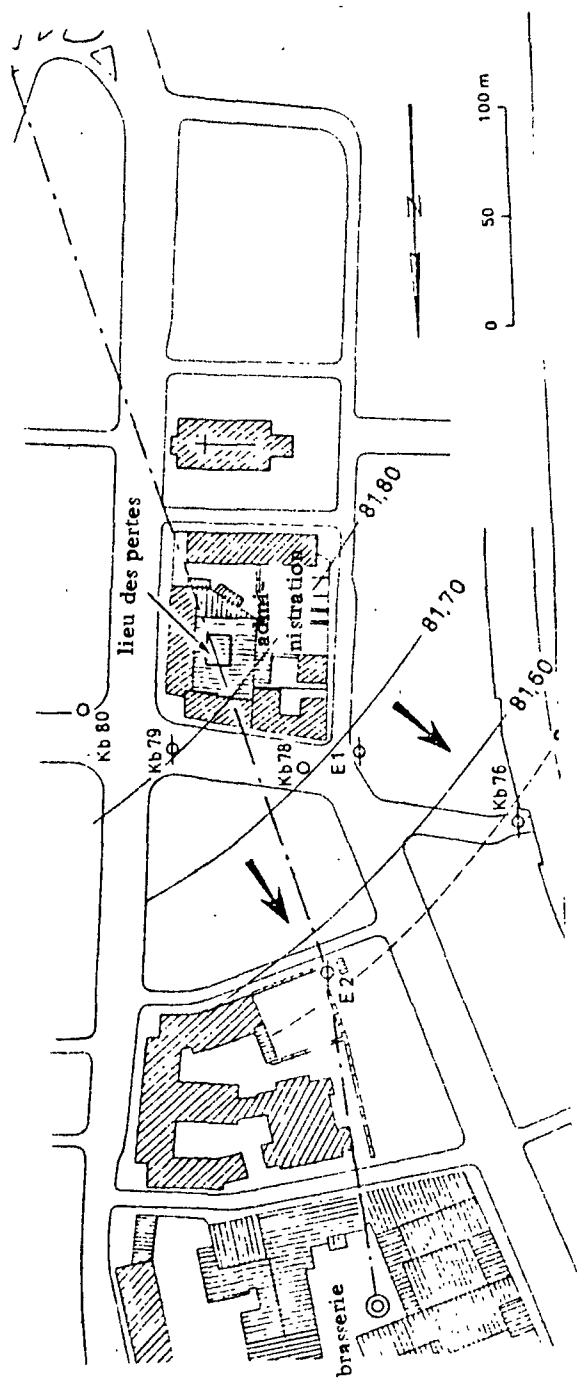


Fig. 4.218 : Cas Bochum II. Esquisse de situation.

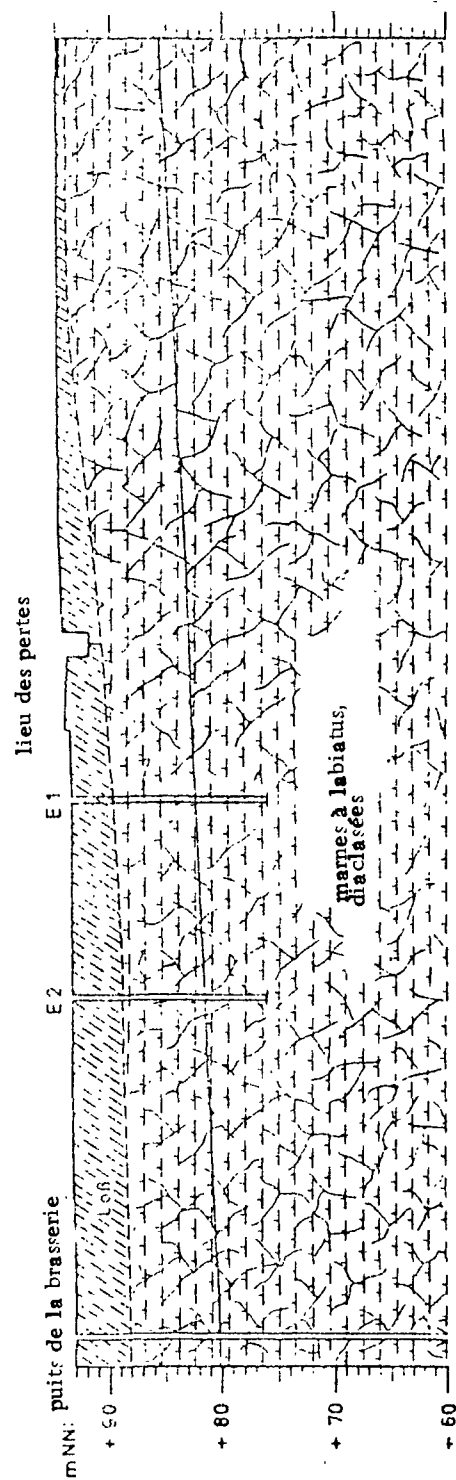


Fig. 4.219 : Cas Bochum II. Coupe géologique.

Ainsi, ce barrage naturel a évité une extension de la phase huile sur la nappe. La forte accumulation de l'huile dans le puits s'explique par le refoulement de l'huile dans le réseau de diaclases grâce à ce barrage. En raison de cette circonstance favorable, aucun danger n'existait pour les puits placés dans le courant souterrain. Evidemment on devait renoncer durant des mois, jusqu'à la fin des travaux d'assainissement, à l'abaissement de la nappe prévue pour la construction du métro. Elle aurait fourni à l'huile la possibilité de passer sous le barrage naturel.

Pour récupérer l'huile, on a mis le puits pollué en service continu et creusé deux autres puits d'écopage à environ 30 m de distance des pertes. Le fait que seuls ces puits et le puits pollué aient pu être exploité avec succès dans cet espace réduit, montre que, dans l'aquifère karstique, l'huile ne s'est pas déplacé sur un large front, mais seulement dans quelques voies privilégiées.

La fig. 4.222 montre l'évolution de la récupération de l'huile. Aucune balance n'a été établie, car la masse perdue n'est pas connue. En tout, on peut penser que plus de 10 m³ ont pénétré dans l'aquifère. On a récupéré en tout 9,5 m³ d'avril à décembre 1971 dont plus de 60 % dans les 63 premières semaines. En 1972, on a encore repris 0,1 m³, en 1973 seulement 0,05 m³.

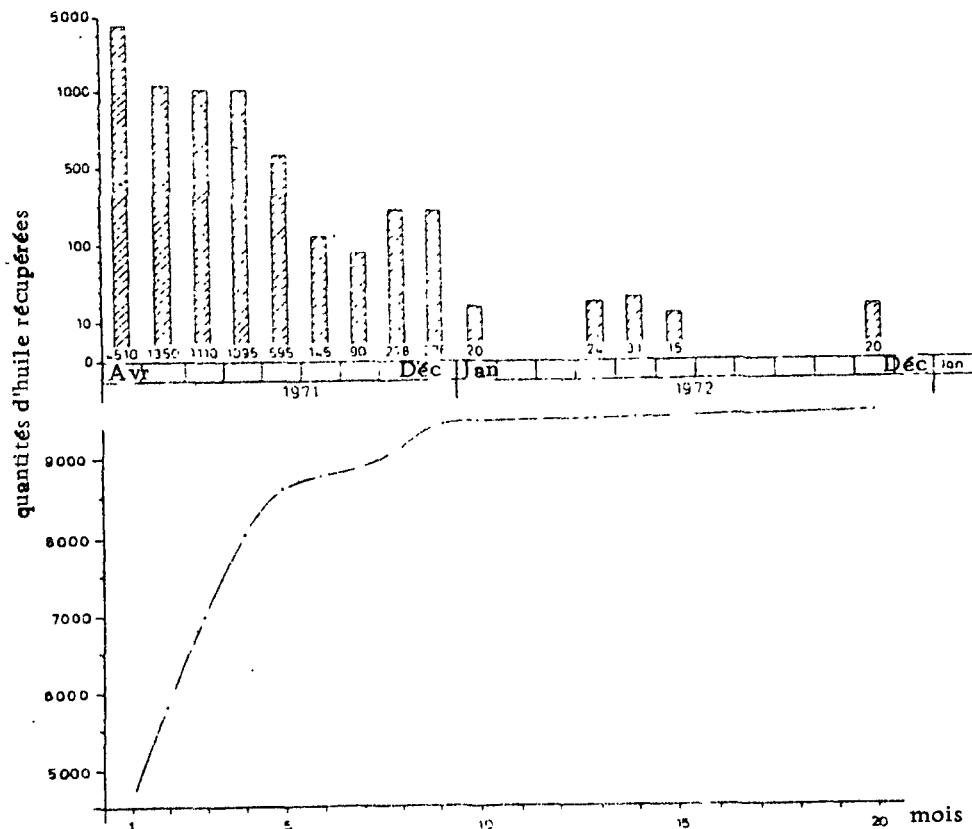


Fig. 4.222 : Cas Essen, centre ville. Récupération de l'huile.

Les travaux d'assainissement ont été arrêtés en 1973, après qu'on n'avait plus récupéré dans les puits des quantités significatives d'huile et que, dans les essais de pompage le long de la rue du tramway, aucune huile ne fut décelée. Pendant les deux années suivantes, le niveau de la nappe fut abaissé sur 300 m dans le courant souterrain du puits polluée, aucune huile n'est sortie de l'aquifère concerné.

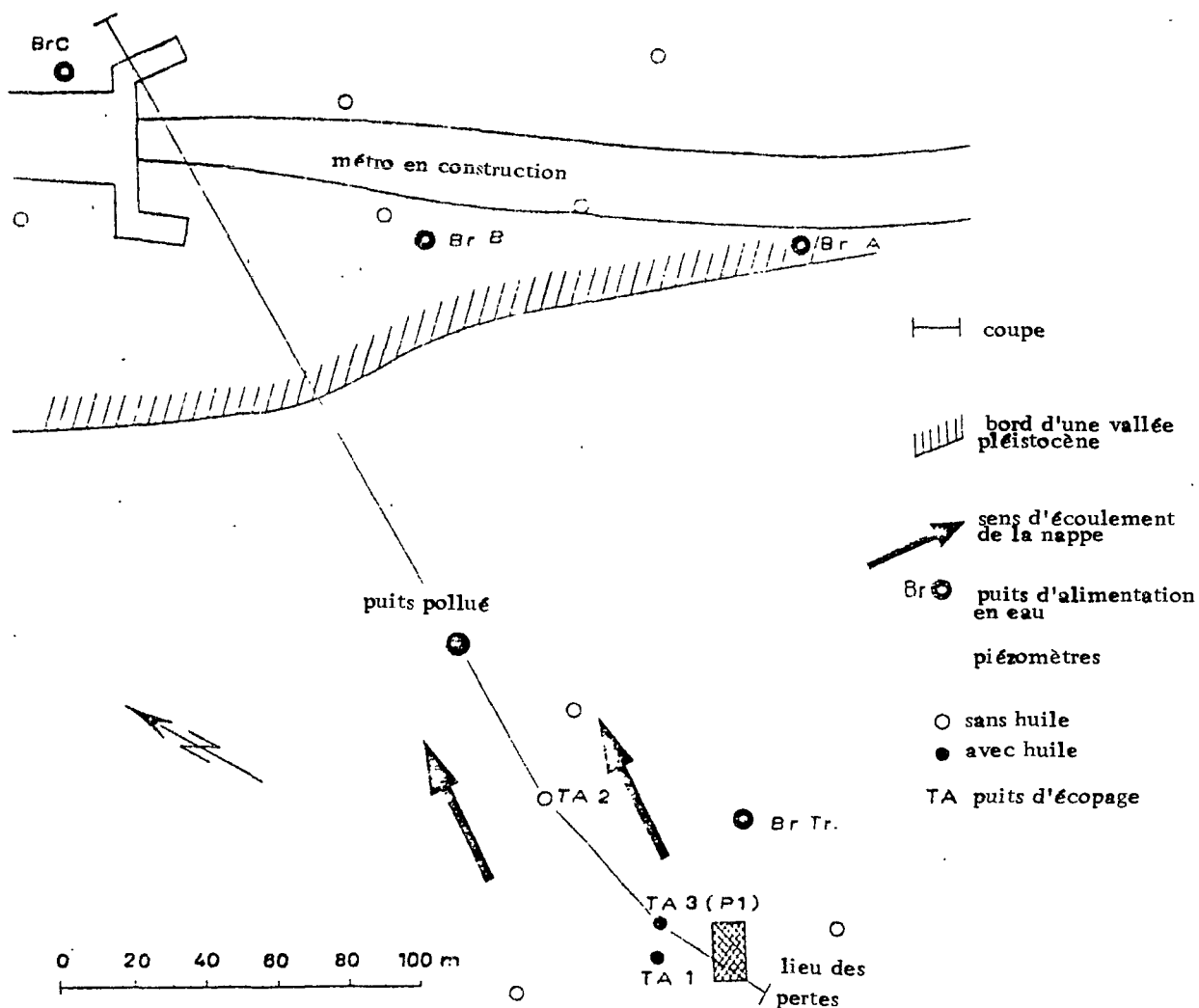


Fig. 4.220 : Cas Essen, centre ville.

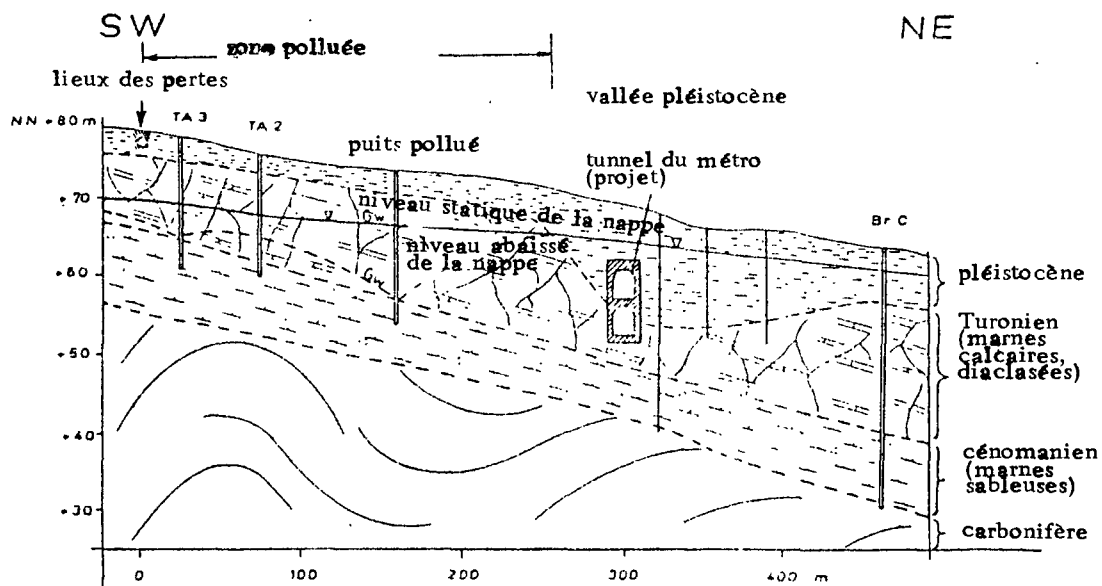


Fig. 4.221 : Cas Essen, centre ville. Coupe hydrogéologique.

Cas 212 : Coesfeld (Munsterland)

Un mélange essence-bitume a été constaté dans un puits particulier ; il provenait d'une station d'essence éloignée d'environ 150 m. A la suite d'un remplissage excessif, le bitume isolant a été en partie dissous. Par corrosion extérieure se sont produits des trous par lesquels, au cours de plusieurs années, au moins 40 m³ d'essence se sont écoulés et se sont infiltrés dans le sol.

Aux environs des pertes affleurent des marnes calcaires crétacées (Campanien) à pendage nord. Ces couches sont grossièrement diaclasées et sont donc relativement favorables à la circulation de l'eau. La surface de la nappe se situe vers la profondeur de 7-8 m ; l'écoulement se fait en direction ESE. Grâce à des forages, transformés en puits et à des sondages, l'extension de l'huile sur la nappe a pu être suffisamment précisée (fig. 4.223 et 4.224).

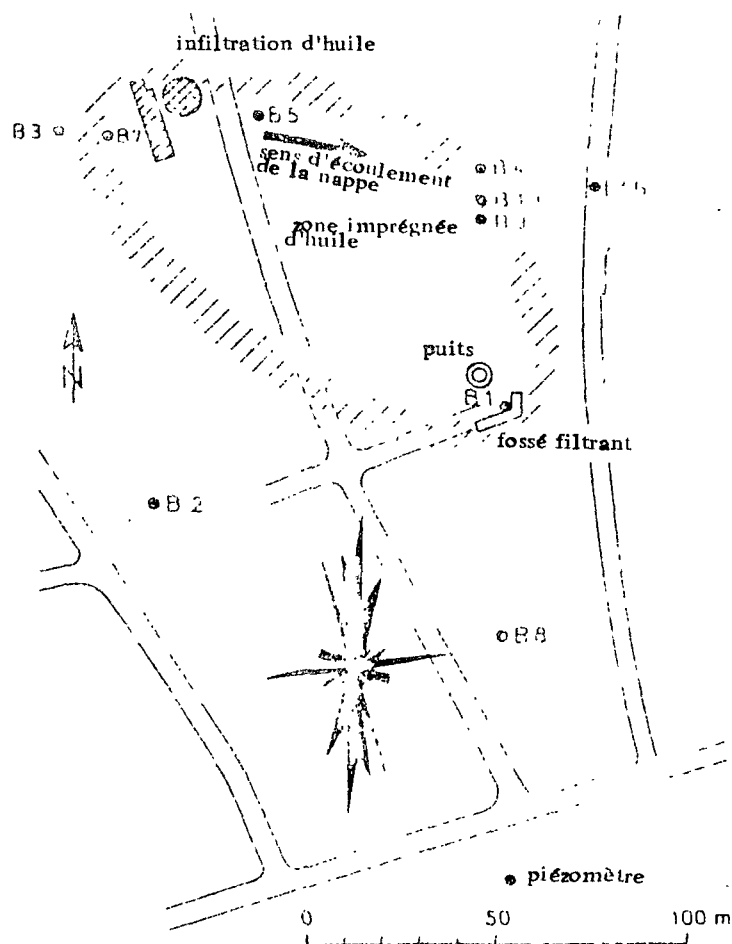


Fig. 4.223 : Cas Coesfeld. Esquisse de situation.

Il est remarquable que l'axe longitudinal de la flaque d'huile ne concorde pas avec la direction d'écoulement de la nappe, mais s'en écarte sensiblement vers le Sud. Cet effet peut être expliqué à l'aide du diagramme des diaclases. Les diaclases principales, représentant les voies préférentielles de la circulation, recoupent pour la plupart la direction d'écoulement de la nappe. La pente de la nappe montre - bien que faiblement - une composante réelle vers le Sud, ce qui explique que la déviation le long des diaclases se soit faite vers le Sud et non vers le Nord.

L'épaisseur des couches d'huile dans les piézomètres est très variable, même dans des puits voisins. Ainsi dans B4 la couche d'huile était de 50 cm, dans B9 de 10 cm. Le puits B10, situé entre les deux, était d'abord sans huile, mais après pompage de l'huile y est venue. Les variations rapides des épaisseurs d'huile dans les puits étaient remarquables, par exemple de 10-90 cm en B4. De même, les quantités d'huile récupérées par jour dans les puits subissaient de fortes variations.

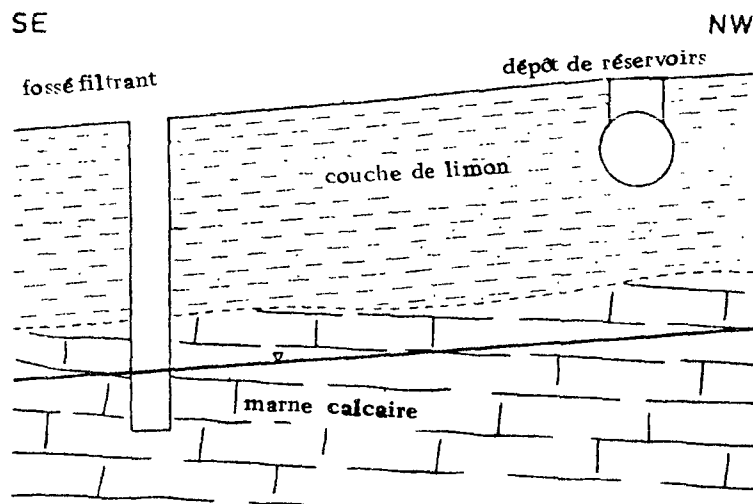


Fig. 4.224 : Cas Coesfeld. Coupe géologique simplifiée.

Pour activer l'assainissement du sous-sol, on a creusé sur le front de la flaque d'huile un fossé filtrant long de 20 m, profond d'environ 7-8 m ; à partir du 8e mois suivant la découverte de la pollution, on a abaissé la nappe. De la sorte, on a récupéré 21 m³ en l'espace de 3 mois, puis 0,6 m³ d'huile après 4 autres mois. 12 mois plus tard, le pompage a été arrêté car les arrivées d'huile étaient très faibles.

Cas 213 : Picardie

Durant la longue période de sécheresse de l'année 1976, les habitants d'une petite commune de Picardie envisageaient de réutiliser leurs puits domestiques, car la distribution d'eau communale ne pouvait plus satisfaire totalement aux besoins. A leur grand étonnement, ils trouvèrent dans leurs seaux du fuel domestique pratiquement pur. Au total, on a sorti des puits à l'aide de pompe et de seaux 75 à 100 m³ d'huile (figure 4.225).

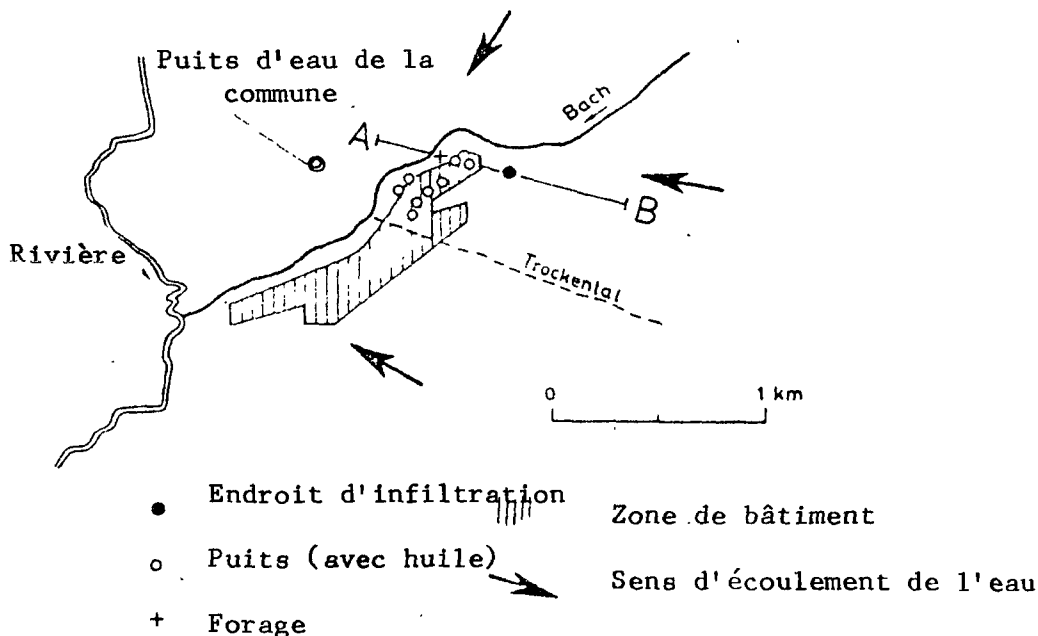


Fig. 4.225 Cas Picardie. Schéma de la situation

Le lieu de cette pollution se situe dans un secteur de craie recouverte de colluvions limoneuses. L'épaisseur de cette formation de recouvrement croît du versant vers l'axe de la vallée depuis 1 m jusqu'à plusieurs mètres. L'eau souterraine s'écoule dans l'ensemble d'est en ouest, avec une pente de 1 à 2 %. Le domaine de fluctuations du niveau piézométrique est de 1 à 2 m. Dans les puits domestiques, le toit de la nappe se situe selon les endroits entre 5 et 10 m sous le niveau du sol.

On a mis en évidence qu'un stockage souterrain est à la source de cette pollution. A cet endroit, 5 m³ de fuel s'étaient écoulés 6 mois avant la découverte de la pollution par suite de la rupture d'une canalisation de retour. Probablement cette conduite fuyait bien avant la rupture ; le fuel s'infiltrait verticalement sur environ 10 m dans la zone non saturée jusqu'au toit de la nappe où il se répandait selon la pente. L'extension de l'huile s'est arrêtée avant le bord de la vallée et l'axe du vallon sec. Les colluvions limoneuses, qui présentent une très faible perméabilité, retiennent l'eau souterraine et de ce fait le fuel aussi était retenu (figure 4.226). Ainsi, on peut comprendre qu'après 2 ans et demi l'on puisse encore récupérer du fuel.

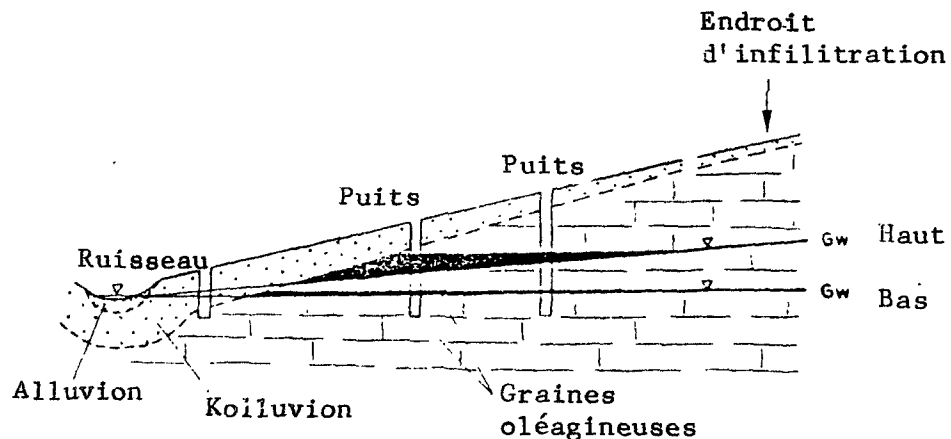


Fig. 4.226 . Cas Picardie. Coupe hydrogéologique

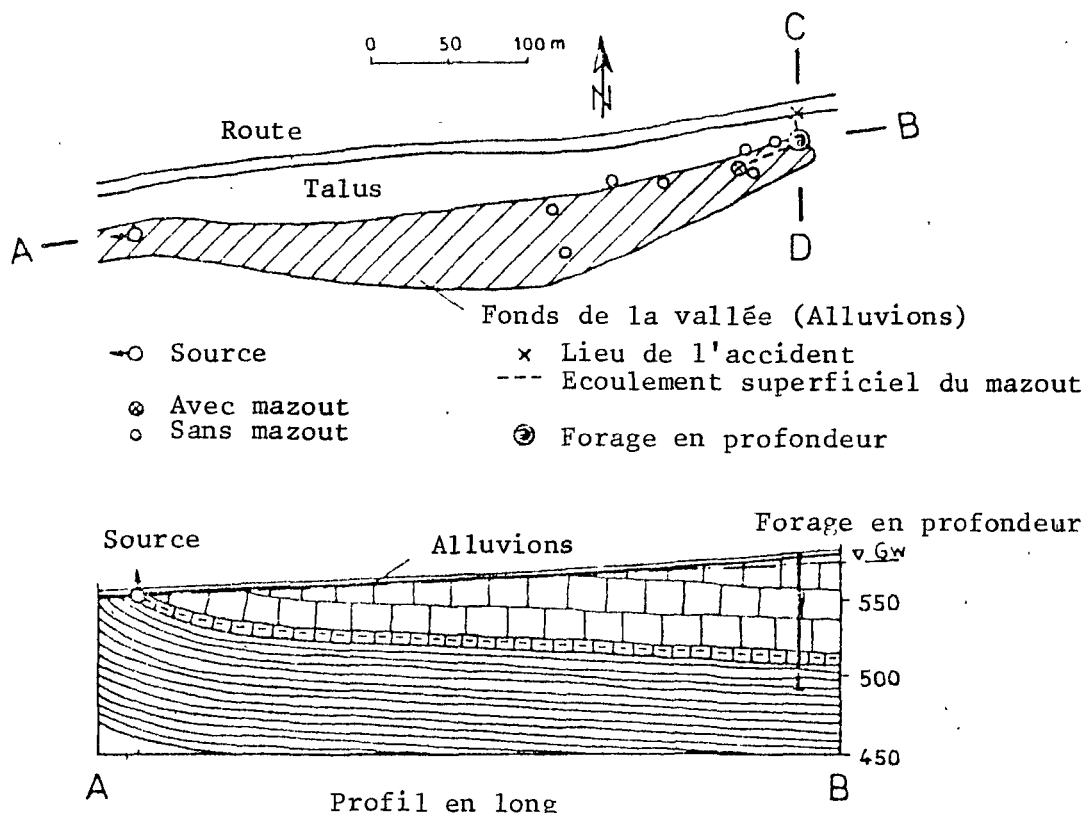
Lorsque le niveau piézométrique est bas, la couche d'huile est plus fine que lorsqu'il est élevé, car dans le premier cas, elle peut s'étendre davantage. Au stade actuel on a renoncé à mettre en place un forage équipé d'un pompage d'eau. On continue de récupérer l'huile dans les puits domestiques "les plus productifs" à l'aide de seaux.

Cas 214 : Charmoille (Jura Suisse)

Sur une route du Jura où des travaux étaient en cours, un camion citerne s'est renversé et a perdu 10m³ de mazout qui s'est répandu sur un versant escarpé de vingt mètres de haut où il s'est infiltré en grande partie dans les calcaires fissurés et karstiques (Figure 4.227). L'écoulement et l'infiltration se sont produits sur une bande d'environ 2 mètres de large et 30 mètres de long. Dans une moindre mesure, le mazout a coulé le long du bord inférieur du versant escarpé sur trente à quarante mètres et s'est infiltré complètement soit dans le calcaire fissuré soit dans les alluvions.

Le terrain même où le mazout s'est infiltré contient à 430 mètres une source (Figure 4.227) qui déverse généralement à peu près 25-30 l/s et qui pourvoit pour environ les deux-tiers aux besoins d'eau potable d'une population de 9 000 habitants. Il faut craindre que le mazout infiltré n'ait contaminé l'eau de source.

Après l'accident, on a fermé la source par mesure de sécurité, pour éviter le risque de pollution des 12 km de conduites d'eau de source et du réservoir par le mazout et aussi pour éviter l'infiltration d'eau mazoutée dans le réseau d'approvisionnement. En compensation, on a pu tirer une plus grande quantité d'eau que d'habitude d'une réserve d'eau profonde située dans une autre région et d'autre part, il a été possible de trouver de l'eau dans les communes voisines, au prix cependant de la construction superficielle en toute hâte d'une conduite mesurant plus de 2 km de long. Mais, comme cette conduite ne pouvait pas servir pendant les trois à quatre mois de gel hivernal qui s'annonçaient, on a procédé à de nouveaux forages près de la pompe déjà en fonctionnement, afin de puiser un peu plus dans la nappe phréatique.



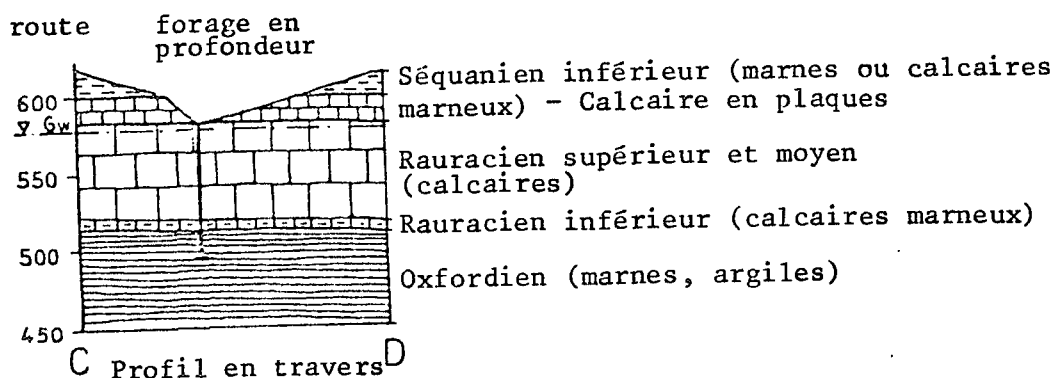


Figure 4.227 : Cas Charmoille. Dessin des lieux.
Coupes géologiques

Parallèlement aux mesures prises pour assurer l'alimentation en eau potable, des travaux ont été engagés contre la pollution hydrocarburée. D'abord, huit sondages ont été opérés dans les épaisses alluvions descendant jusqu'à quatre mètres dans le fond de la vallée et aussi dans les quelques mètres superficiels du rocher calcaire sous-jacent (Figure 4.227). C'est seulement à proximité de l'infiltration de mazout observée après l'accident, c'est-à-dire là où le mazout avait reparu en surface dans la prairie, qu'un forage unique a rencontré du mazout dans la nappe phréatique qui se trouve ici, dans les alluvions, à un niveau nettement plus élevé que dans le karst. A côté du point de forage, on a aménagé une fosse d'où il a été possible de pomper 0,6 m³ de mazout, ce qui a permis de dépolluer localement le fond de la vallée. Les contrôles ultérieurs opérés dans les forages au piéso-mètre et dans les fossés qu'on avait volontairement omis de combler pendant un certain temps n'ont plus révélé la présence de mazout.

Pratiquement il était impossible d'envisager l'enlèvement de la masse principale de mazout infiltrée dans le rocher calcaire. Pour savoir si le mazout avait pénétré jusqu'à la nappe phréatique et, le cas échéant, pour pomper l'eau polluée de cette nappe phréatique, on a procédé, au pied du versant escarpé et au-dessous du lieu de l'accident, à un forage de 89 m de profondeur (Figure 4.227). Ce forage a atteint la nappe phréatique dans le calcaire à 9 m de profondeur. Il a permis de retirer seulement 1,7 l/s d'eau qui avait une forte odeur de mazout et 6 mg/l de mazout dissous, mais pas de mazout proprement dit. Il n'a donné aucun renseignement sur les lieux où se trouvait la grande masse infiltrée de mazout. Les pompages n'ont pas été poursuivis, à cause de leur efficacité insuffisante comme procédé d'épuration.

Jamais on n'a décelé de mazout à la source distante de 430 m du lieu de l'accident. Aussi a-t-elle été réutilisée un an après l'accident pour l'approvisionnement en eau. D'ailleurs, aucun autre lieu voisin du lieu de l'accident n'a jamais été signalé comme contenant de l'eau de source polluée par le mazout. Par conséquent, on ne sait toujours pas

où se trouvent les quelque 9 m³ de mazout infiltré et qui n'a jamais été récupéré. Peut-être ce mazout est-il retenu dans les siphons du système karstique et peut-être le mazout est-il en cours de dissolution en sous-col avant le jaillissement de l'eau.

Cas 215 : Langebruck (Jura suisse)

Sur une route de col du Jura une voiture de sport a quitté la partie droite de la chaussée sous l'effet d'un excès de vitesse et est entrée en collision avec un camion-citerne chargé de mazout et venant en sens inverse. Le camion, renversé, a heurté une paroi rocheuse et la citerne s'est mise à fuir, répandant sur la chaussée entre 5 et 6 m³ de mazout. Ce mazout s'est déversé dans la rigole du côté de la montagne. Il a suivi pour une faible part une première conduite d'écoulement des eaux et, pour une part beaucoup plus grande, une deuxième conduite jusqu'à un talus aménagé sur la route du côté de la vallée (Figure 4.228).

Dans la zone d'infiltration de mazout, les calcaires fissurés et les couches poreuses des versants contiennent une nappe phréatique dont l'affleurement donne des sources qui sont canalisées. Près de l'infiltration de mazout, ces canalisations (I) comprennent une galerie s'avancant sous le versant et deux conduites d'eau infiltrée à faible profondeur.

Quelques heures après l'accident, l'eau utilisée par une commune a été massivement polluée par le mazout. L'eau mazoutée avait déjà coulé dans la conduite d'eau de source longue de 2 km et elle était parvenue dans un des réservoirs de la commune.

Il a fallu pendant trois jours que la partie de la commune alimentée par cette source soit approvisionnée en eau potable par camions-citernes. Une tentative d'épuration de la conduite d'eau de source avec des produits lipolytiques ayant échoué, il a fallu adoucir l'eau de la conduite pour en enlever tout le mazout accroché à ses parois, ce qui a du moins permis d'utiliser l'eau de plus petites sources qui n'avaient pas été polluées (II et III). Mais, pour assurer l'approvisionnement en eau, il a été indispensable de procéder aussi à un raccordement de fortune au réseau d'une commune voisine. Cependant, comme cette mesure de substitution était insuffisante, l'approvisionnement en eau est resté précaire.

Après l'accident, un fossé (I sur la figure 4.228) a été creusé près de la source polluée, au pied du talus, et une grande quantité de mazout y a été recueillie qui a été brûlée pendant toute la nuit qui a suivi la journée de l'accident. Techniquement, cependant, il est apparu impossible de déplacer le talus haut de 10 mètres de façon à pomper le mazout dans le sol qui en était imprégné en profondeur. Il a fallu trouver d'autres moyens pour redonner à la commune l'usage de sa source. Le prolongement de l'ancienne galerie (Figure 4.229) a dégagé dans la partie arrière une eau dépourvue de mazout qui a pu servir à l'approvisionnement, mais sans pouvoir remplacer, il s'en faut de beaucoup, la quantité d'eau perdue. Il s'est donc avéré nécessaire de refaire la canalisation de l'eau de source au-dessus de la zone polluée par le mazout. A cet effet, on a creusé un puits de 9,5 m (Figure 4.228 et figure 4.229), ce qui a complété avec succès l'action entreprise pour remédier aux effets de l'accident.

Toutefois, l'accident a encore exigé l'aménagement d'un écoulement d'eau pour qu'à l'avenir l'eau provenant de la route ne puisse plus parvenir dans la zone des conduites d'eau de source. En outre, des glissières ont été aménagées tout le long de la zone des conduites d'eau.

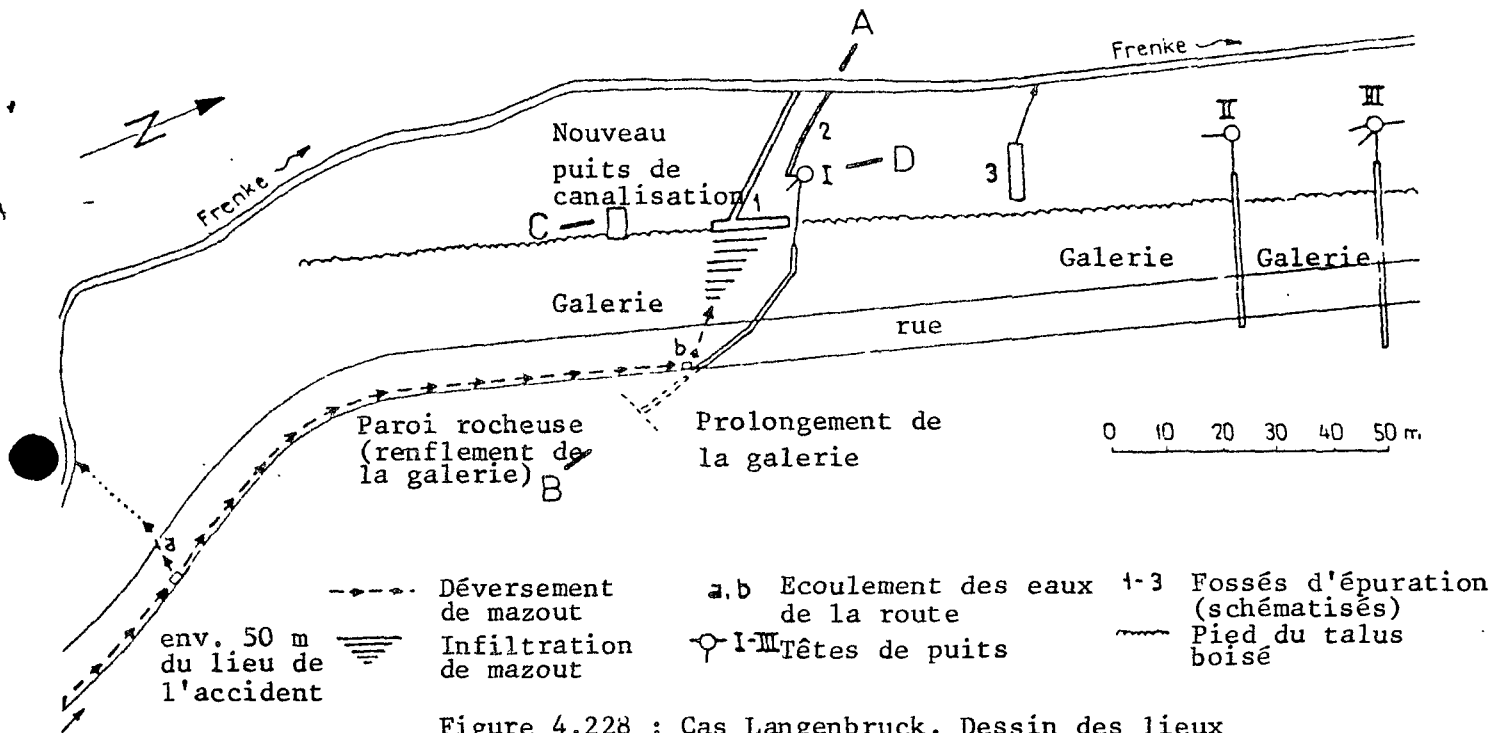


Figure 4.228 : Cas Langenbruck. Dessin des lieux

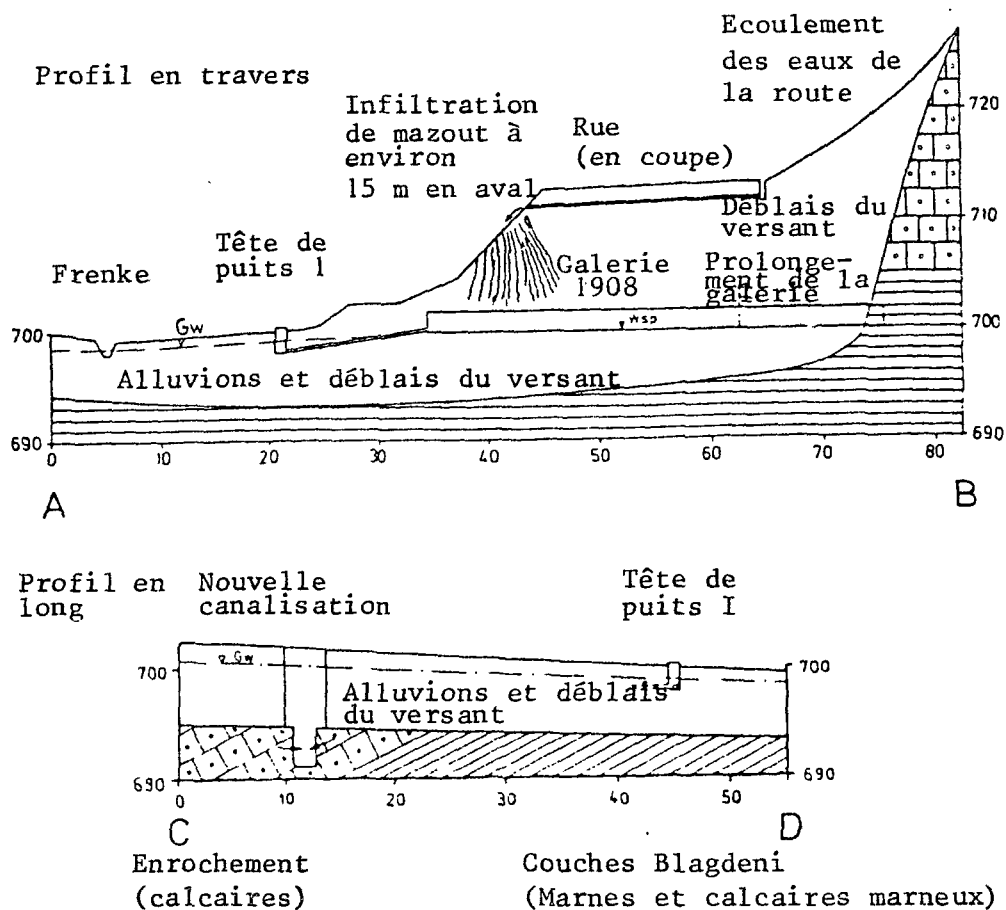


Figure 4.229 : Cas Langenbruck. Coupes géologiques