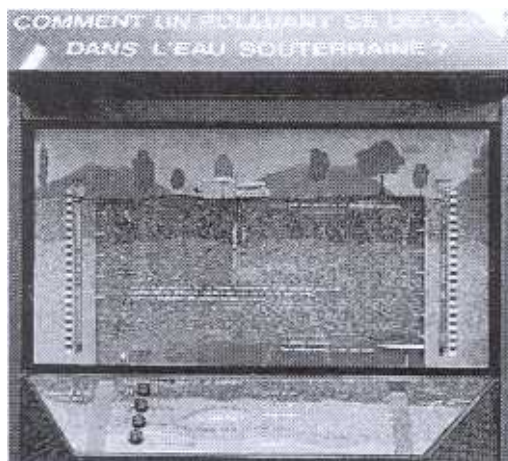


# DOSSIER 10

## Pollution et alimentation des nappes phréatiques

185



### Collection de l'Atelier d'exploration

#### Conception

Laboratoire d'hydrodynamique des milieux poreux de l'Institut de mécanique des fluides  
Unité associée au CNRS n° 854, Université Louis Pasteur, Strasbourg

#### Conseiller scientifique

C. Cosandey

Laboratoire de géographie physique, CNRS, Meudon

#### Réalisation

P. Bastide, A. Billet, J. Deléglise, C. L'hénoret, F. Eckly, J. Pasqualini

## **1. Contenu scientifique**

Importance des eaux souterraines

Les principaux types d'aquifères et de nappes

Visualisation de la circulation de liquides dans un milieu poreux  
et du transport d'un polluant par l'eau souterraine

L'approche hydrodynamique de l'écoulement d'un fluide  
dans un milieu poreux

Caractéristiques des paramètres d'un réservoir poreux

Les phénomènes de transport dans un aquifère poreux

Alimentation des nappes phréatiques

## **2. Description de la manipulation**

Comment un polluant se déplace dans une nappe phréatique ?

Comment sont alimentées les nappes phréatiques ?

# Introduction

Dans nos pays tempérés qui, jusque-là, n'avaient jamais manqué d'eau, les sécheresses des années successives (1989, 1990, 1991, 1992) ont amené à considérer ce précieux liquide comme l'un des enjeux du développement de notre société. Les aléas climatiques, en asséchant les ressources en eau de surface, ont favorisé l'exploitation des eaux souterraines. Or, ces eaux, contrairement à ce que l'on pouvait espérer, étaient pour beaucoup d'entre elles polluées ou en voie de l'être : d'une part, avec l'apparition et l'amplification des pollutions d'origine agricole (utilisation intensive des nitrates et pesticides, communication d'une nappe saine avec une nappe polluée provoquée par des forages de plus en plus profonds) ; et, d'autre part, par la multiplication des cas de contamination ponctuelle le plus souvent d'origine industrielle (chlorures, sulfates, hydrocarbures, métaux, solvants organiques,...). On a pris conscience que la plupart des eaux souterraines n'étaient pas entièrement protégées des pollutions qui, par ailleurs, étaient rarement détectées à l'instant où elles se produisaient. Le temps de transfert à l'intérieur des nappes souterraines peut être très long (plusieurs dizaines d'années par kilomètre pour des sols faiblement perméables). Il en résulte que les eaux de certains aquifères constituent une mémoire d'un passé que l'on voudrait oublier ou un héritage indésirable pour les prochaines générations. Les eaux souterraines sont fragiles et toute action de dépollution est coûteuse. Il est donc préférable d'agir au niveau préventif, tant dans le domaine de la connaissance, en affinant notre approche, que dans le domaine de l'éducation et de l'information. Pour cela, il faut agir sur l'opinion publique pour que les eaux souterraines soient considérées comme un patrimoine qu'il convient de gérer aujourd'hui pour demain.

« ... la totale ignorance des différents acteurs de notre société (sauf quelques milliers d'initiés) envers les mécanismes d'alimentation, d'écoulement et de contamination des eaux souterraines est en grande partie responsable des pollutions. Il est absolument nécessaire de développer des actions de formation et d'information pour tous, en utilisant tous les supports médiatiques possibles, ce qui présuppose une formation urgente des acteurs de ces métiers. » Avec les manips de ce dossier nous œuvrons pour que ce constat cité dans l'introduction du rapport de l'académie des Sciences « Pollution des nappes d'eau souterraine en France » publié en 1991, suscite de nombreuses actions de diffusion culturelle des connaissances sur les eaux souterraines.

Les scientifiques, habitués à entreprendre des actions culturelles du type grand public sur les eaux souterraines, nous ont fait part des fausses certitudes et des généralisations hâtives qu'ils ont rencontrées et qui constituent autant d'obstacles à la compréhension du fonctionnement des nappes phréatiques, telles que :

- l'eau circule dans le sol verticalement ; il n'existe pas de circulation horizontale ; si du polluant s'enfonce dans le sol, il n'y a pas pollution de toute la nappe ;

- le sol est un très bon filtre ;

- l'eau souterraine s'écoule sous la forme de fleuve dans des cavités et, de temps en temps, il y a des résurgences qui donnent des sources ; etc.

La plupart de ces attitudes sont issues de ce que l'on voit des circulations de l'eau dans le sol (les grottes, les galeries souterraines,...). Le grand public dispose de peu d'informations pour imaginer comment, sous ses pieds, l'eau circule dans un milieu poreux.

Pour nous, la visualisation des mécanismes d'alimentation, d'écoulement de l'eau et des processus de pollutions dans les nappes souterraines constitue l'axe fort d'une communication par exposition. N'oublions pas que, pour connaître ces écoulements, les scientifiques réalisent des expériences qui les mettent en évidence, que ce soit à l'échelle d'un bassin versant ou d'une zone locale.

Les deux manips de ce dossier « Comment sont alimentées les nappes phréatiques ? » et « Comment un polluant se déplace dans l'eau souterraine ? » sont essentiellement des dispositifs de visualisation. Elles mettent en œuvre des phénomènes réels, d'où une certaine lenteur dans les processus événementiels qui décourage le visiteur impatient. Ainsi elles posent le problème de la transposition de manipulation de laboratoire en objet pédagogique interactif d'exposition. La manip « Comment un polluant se déplace dans l'eau souterraine ? » est un exemple de ce qu'un laboratoire peut faire pour présenter ces recherches aussi bien aux décideurs qu'au grand public. Elle a été réalisée à la fin des années 80 par le Laboratoire d'hydrodynamique des milieux poreux de l'Institut de mécanique des fluides (Unité de recherche associée 854 CNRS-Université Louis Pasteur de Strasbourg). L'objectif des recherches est, entre autres, de mettre à disposition des services chargés de l'approvisionnement en eau potable, des outils fiables pour évaluer l'extension et la propagation d'une contamination, pour décider des mesures à prendre pour continuer à alimenter en eau potable et mettre en œuvre les moyens de dépollution.

# 1. Contenu scientifique

Les eaux souterraines forment l'essentiel des stocks d'eau liquide présente dans les terres émergées (de l'ordre de 98 % à 99 %) et une part notable des écoulements totaux d'eau douce de notre planète : près du tiers de tous les flux d'eau qui circulent dans l'espace terrestre sont souterrains pendant un temps plus ou moins long et sur des distances variées de leur parcours.

## Importance des eaux souterraines<sup>1</sup>

188

Elles constituent une ressource largement utilisée dans le monde : environ six cents à sept cents milliards de mètres cubes par an sont aujourd'hui tirés du sous-sol, soit au moins un cinquième de toute l'eau prélevée pour tous usages confondus. Cette proportion est plus forte dans les pays de la zone aride où les eaux superficielles sont rares et très irrégulières. L'abondance des ressources en eau souterraine offrent dans bien des régions de larges possibilités de croissance de leur utilisation : production d'eau potable, usages industriels et irrigation.

En France, on estime que les prélèvements d'eau souterraine sont de l'ordre de sept milliards de mètres cubes par an, soit 20 % de tous les prélèvements en eau bruts (hormis ceux des canaux de navigation, de l'hydroélectricité avec rejets en mer). Ce pourcentage s'élève à près de 40 % si l'on exclut les prélèvements d'eau de surface pour le refroidissement des centrales thermiques, presque entièrement restitués, à l'exception des quantités évaporées. Ces prélèvements se répartissent principalement entre trois secteurs : 54 % pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (soit 3,5 milliards de m<sup>3</sup>/an) ; 25,8 % pour l'industrie (non raccordée) ; 19,7 % pour l'agriculture (irrigation).

La proportion des demandes en eau couverte par l'exploitation d'eau souterraine par rapport aux volumes totaux utilisés est la plus forte dans le secteur de l'alimentation en eau potable : 60,5 % en moyenne (et jusqu'à 95 % dans certaines régions, comme Paris, le Nord, l'Alsace), non négligeables pour les industries non raccordées 34,5%, et pour l'irrigation 28,7 %. Près de la moitié de ces volumes

est prélevée dans les aquifères alluviaux - et par conséquent en interaction directe avec les cours d'eau - tandis que plus de 30 % proviennent des nappes libres des bassins sédimentaires et près de 20 % des nappes captives des aquifères profonds. Une nappe est dite libre quand son toit est en contact avec l'air atmosphérique à travers le domaine non saturé. Elle est captive lorsque son toit est limité par une couche perméable. La quasi-totalité de la population française est désormais desservie par un réseau public de distribution d'eau potable. Pour 60 % d'entre elles, les eaux distribuées sont d'origine souterraine, prélevées à partir de 29 000 captages de sources, puits ou forages. Cela correspond à 85 % des communes approvisionnées exclusivement à partir d'eaux souterraines. La consommation moyenne totale d'eau domestique est de l'ordre de 140 l/j/hab. et de 190 l/j/hab. si l'on inclut les collectifs, commerces et petites industries.

Par rapport aux eaux de surface, les eaux souterraines présentent souvent plusieurs avantages : une accessibilité qui en fait une ressource appropriée aux utilisations dispersées ; des coûts de captages, de traitement moins élevés et d'exploitation (énergétique) souvent nulles (captages gravitaires) ou minimales (pompages à faible profondeur) ; de faibles variations saisonnières et interannuelles, à l'exception des aquifères karstiques, ce qui affranchit généralement l'exploitation d'eau souterraine des aléas climatiques et permet de satisfaire les demandes de pointe ; une régularité de la température et de la qualité ; une meilleure protection vis-à-vis des polluants entraînés lors des forts épisodes pluvieux et des pollutions accidentelles. Lorsque les eaux sont polluées, le nombre de polluants est limité. Ces dernières années, ces avantages tendent à disparaître. En effet, en raison des pollutions d'origine industrielles, agricoles et urbaines, plusieurs centaines de captages d'eau destinée à la consommation humaine ont dû être abandonnés définitivement : le plus grand nombre du fait de teneurs en nitrates très supérieures à la norme, mais beaucoup aussi à cause de pollutions accidentelles par des hydrocarbures, des solvants organiques ou des métaux indésirables. Cet état de fait a, d'une part, des incidences économiques négatives importantes par les coûts des investissements (déplacement de

1. « Importance des eaux souterraines » et « Les principaux types d'aquifères et de nappes » sont repris en partie de l'introduction et du début du chapitre « Généralités sur les

eaux souterraines » du rapport n° 29 de l'académie des Sciences, Pollution des nappes d'eau souterraines en France, novembre 1991.

captages, interconnexion de réseau, usine de traitement) et, d'autre part, dans certaines régions où les nappes sont particulièrement polluées, il devient de plus en plus difficile de trouver des zones de bonne qualité et certains champs captants deviennent « irremplaçables ».

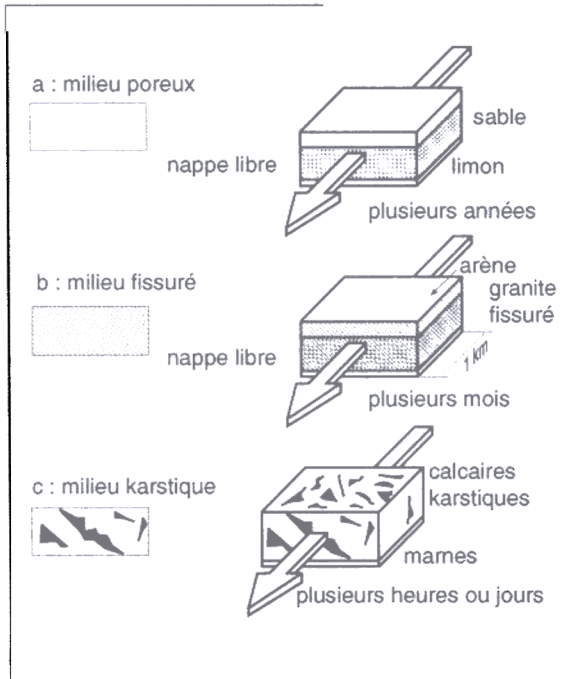
## Les principaux types d'aquifères et de nappes

On distingue deux principales catégories de réservoirs d'eau souterraine.

- Les aquifères à porosité d'interstices (**fig. 1a**), constitués de sables, graviers, grès, etc. ; c'est le cas des nappes alluviales qui occupent les fonds de vallée et d'une partie des nappes des grands bassins sédimentaires. Les vitesses d'écoulement y sont, en général, lentes.

- Les aquifères hétérogènes à fissures (**fig. 1b, 1c**), sont surtout constitués de calcaires mais également de roches volcaniques, granitiques ou gréseuses. Dans les massifs calcaires, les fissures sont souvent ouvertes (aquifères de type karstique) et constituent de véritables conduits souterrains dans lesquels la vitesse de circulation des eaux peut être très rapide. L'écoulement de l'eau en conditions naturelles : les eaux souterraines sont courantes et non stagnantes. Les nappes sont alimentées, pour l'essentiel, par l'infiltration sur de grandes surfaces d'une partie des eaux de pluies qui, compte tenu de l'évapotranspiration, sont surtout efficaces entre les mois d'octobre et d'avril. Ainsi, l'alimentation des eaux souterraines ne dépasse guère 20 % des précipitations annuelles. Le mouvement de l'eau vers la nappe se fait en fonction de la porosité et de la perméabilité du sol et de la zone non saturée. La vitesse d'infiltration varie de moins d'un mètre par an - par exemple dans la craie de Champagne - à un mètre par mois dans les calcaires de Beauce et plusieurs mètres à l'heure dans les terrains très fissurés de type karstique. Entre la zone d'infiltration

Figure 1



Différents types d'aquifères (ordre de grandeur du transfert sur 1 km).

Figure 2

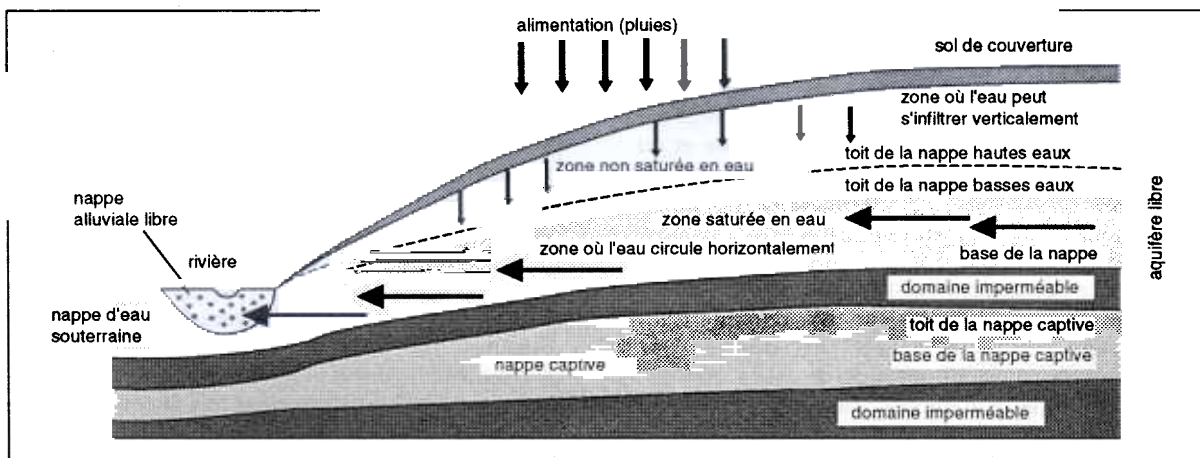


Schéma de structure du sous-sol.

Il montre la distribution de l'eau dans la partie superficielle de l'écorce terrestre et met en relief l'existence d'une circulation d'eau horizontale à travers l'empilement des sables et graviers (aquifère) : la « nappe » d'eau souterraine est formée par cette eau imbibant les sables et graviers et circulant au travers des petits vides existant entre les grains empilés. Imaginons qu'une tige soit enfoncée progressivement dans le sol. Elle traversera successivement les différentes zones du sous-sol avant d'atteindre la limite du fond imperméable.



et l'exutoire, l'eau souterraine se déplace dans l'aquifère par gravité, des lieux les plus hauts vers les points les plus bas. Le volume d'eau mouvante a une surface en pente que révèlent les niveaux d'eau des puits et des forages. La vitesse d'écoulement des eaux souterraines est liée à la perméabilité de l'aquifère, elle-même fonction de la taille de l'interstice (granulométrie), de la fissure ou de la cavité. Ainsi le transfert d'un même volume d'eau sur une même distance (de l'ordre du kilomètre) peut nécessiter quelques années en alluvions et en milieu poreux, quelques mois en milieu fissuré et quelques jours, voire quelques heures, en milieu karstique. Les eaux souterraines sont réparties en de nombreux bassins hydrogéologiques souterrains dont la forme et les limites peuvent parfois être très différentes de celles des bassins superficiels. Les aquifères sont des réservoirs qui fuient en permanence. L'eau s'en échappe par les sources. Ils peuvent être aussi drainés par les cours d'eau, les eaux souterraines assurant la quasi-totalité du débit d'étiage. Inversement, dans certaines conditions, les rivières peuvent s'infiltrer totalement ou partiellement dans le sous-sol et alimenter les aquifères. Après un parcours souterrain plus ou moins long, elles peuvent donner naissance à des résurgences.

### Visualisation de la circulation de liquides dans un milieu poreux et du transport d'un polluant par l'eau souterraine<sup>2</sup>

Le chercheur qui étudie l'écoulement de l'eau (et autres liquides qui peuvent s'infiltrer dans le sous-sol) désigne l'empilement des sables et graviers (avec présence d'argile éventuellement) de « milieu poreux » (ou encore « matrice poreuse », les espaces vides étant appelés « pores »). Un milieu poreux est un type de réservoir où l'étude de l'équilibre et du mouvement du fluide - étude comprenant en particulier l'analyse des forces au niveau des parois solides des « pores » en contact avec ces fluides (liquides, gaz) - se complique singulièrement par rapport à la connaissance de la mécanique des fluides dans les conduites et les canaux. L'image d'un « réservoir poreux » naturel est donnée par l'ensemble des alluvions, mélange de galets, graviers, sables et argiles que dépose tout fleuve dans son « corridor ». Ces masses d'alluvions accumulées, à différentes périodes, en formations à épaisseur variable dans des vallées plus ou moins encaissées, constituent « des aquifères à porosité d'interstices ».

L'observation à différentes échelles d'un tel massif granulaire non consolidé met en relief plusieurs « niveaux d'hétérogénéité » du milieu poreux (voir fig. 3). L'accès à la « géométrie » interne d'un milieu poreux est toujours délicat. Malgré les performances d'auscultations locales sur les échantillons au laboratoire, soit par l'intermédiaire de fibres optiques pénétrant le milieu et qui transmettent des images directement sur un analyseur, soit par l'observation sous microscope de lames minces du matériau obtenues après injection de résines dans les pores ou encore d'analyses de sondage et de diagraphies sur le terrain, la connaissance de la structure complexe de pores interconnectés du milieu restera partielle. Quelle que soit l'échelle d'observation, aucune description quantitative d'un réservoir poreux n'a pu être exhaustive. Par l'étude fondamentale de mécanismes de transport de polluants par l'eau dans les sols et sous-sols (sur modèles physiques de laboratoire, par simulation au moyen de modèles théoriques), la recherche développe des outils permettant d'affronter les cas réels de pollution à différentes échelles (soit sur des dizaines de kilomètres pour les langues salées issues des terrils du bassin potassique, soit sur quelques dizaines de mètres à la suite d'un déversement accidentel localisé d'hydrocarbures) et de guider les interventions pratiques pour stabiliser, voire neutraliser les domaines contaminés.

### L'approche hydrodynamique de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux

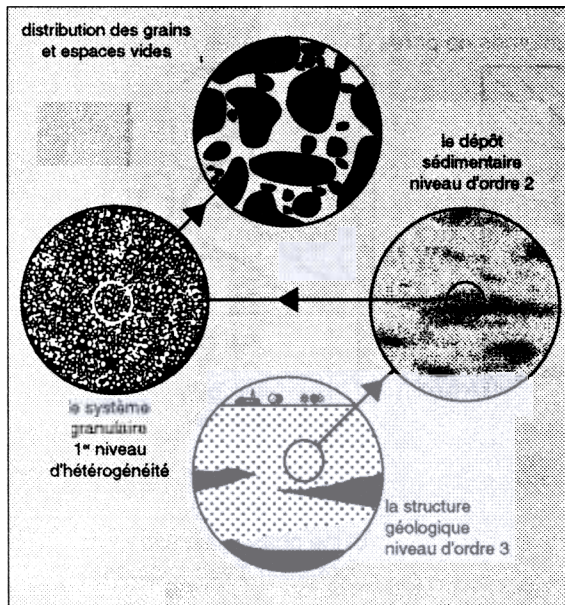
Si l'objectif est de connaître les phénomènes se déroulant à l'échelle du réservoir lors de l'étude du mouvement d'une nappe d'eau souterraine libre défini par le champ de la charge hydraulique, le milieu sera considéré comme un milieu continu : on pourra appliquer alors la théorie du mouvement potentiel avec tous les moyens de résolution mathématique, numérique, analogique.

Dans la plupart des cas, le comportement du ou des fluides contenus dans le réservoir - il peut s'agir d'eaux contaminées soit physiquement (influences thermiques), soit chimiquement (substances dissoutes), soit biologiquement (micro-organismes), ou d'autres liquides non miscibles à l'eau, ou encore de gaz - résulte de mécanismes mis en jeu à l'échelle des pores. Il est alors nécessaire d'acquérir tout d'abord une bonne connaissance de ces phénomènes qui auront naturellement des répercussions à l'échelle du réservoir entier.

2. Les quatre paragraphes suivants sont extraits du chapitre « Porous media and aquifer systems », Zilliox L., *Groundwater*

*ecology*, édité par Gibert J., Danielopol D. L. et Stanford I. A. Academic Press, Londres, 1994.

Figure 3



**Niveaux d'hétérogénéité dans l'observation d'un aquifère sablo-graveleux.**

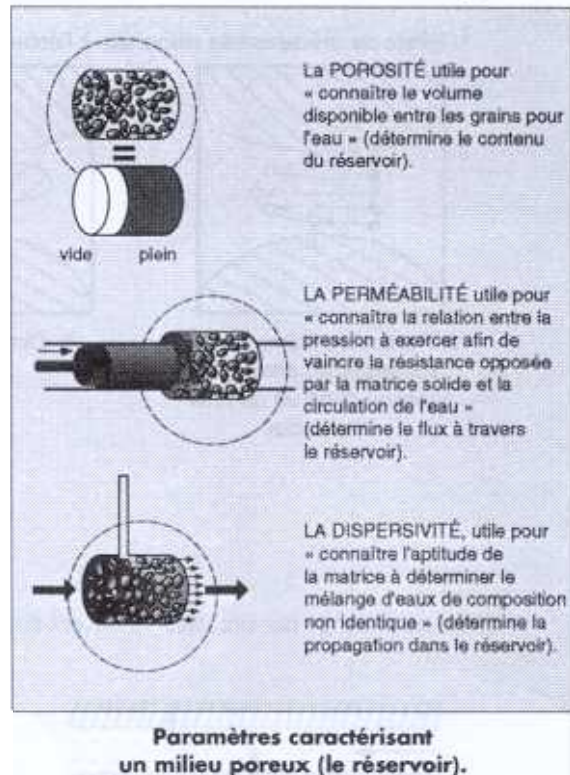
Source : cette figure, ainsi que les trois suivantes, ont été réalisées d'après Spitz, par Beller C., Bouzagaia A. et Sira C., ACPA (Atelier de cartographie et de publications assistées), université Louis Pasteur - U.R.A. 95 CNRS.

Entre les échelles globales - niveau du réservoir - et ponctuelles - niveau du pore - a été introduite l'échelle locale, niveau intermédiaire du « volume élémentaire représentatif » (noté VER et désigné aussi par « volume élémentaire de Référence » du milieu poreux). À cette échelle, l'objectif est d'établir des lois dites « macroscopiques » par des prises de moyennes (au sens des probabilités) sur les lois établies en mécanique des fluides en milieu continu et appliquées dans un pore pris comme conduit élémentaire d'écoulement.

En fait, on passe ainsi d'une caractérisation géométrique fine, métrologiquement inaccessible, au niveau pores à l'échelle suffisamment grande pour y inclure un nombre important d'espaces vides et de pleins de sorte qu'un effet de moyenne s'y manifeste ; on pourra y raisonner comme un milieu continu et y définir localement des « grandeurs macroscopiques ». Ce concept, qui établit une équivalence entre le milieu réel dispersé et un milieu fictif continu, permet difficilement d'appréhender la variabilité spatiale des

3. L'échelle VER est généralement celle de l'échantillon du milieu poreux en laboratoire. Mais toute partie d'un aquifère naturel présente des hétérogénéités dont les dimensions vont de celles des espaces vides (existant aussi dans le VER) à celles de la distance par exemple entre un point d'alimentation et un point de captage, ou encore de la distance entre puits d'injection et piézomètre de repérage

Figure 4



La POROSITÉ utile pour « connaître le volume disponible entre les grains pour l'eau » (détermine le contenu du réservoir).

LA PERMÉABILITÉ utile pour « connaître la relation entre la pression à exercer afin de vaincre la résistance opposée par la matrice solide et la circulation de l'eau » (détermine le flux à travers le réservoir).

LA DISPERSIVITÉ, utile pour « connaître l'aptitude de la matrice à déterminer le mélange d'eaux de composition non identique » (détermine la propagation dans le réservoir).

**Paramètres caractérisant un milieu poreux (le réservoir).**

milieux naturels. La loi de Darcy est l'équation du mouvement d'un fluide (l'eau par exemple) à l'échelle du VER où les singularités du niveau granulométrique (échelle des pores) ne sont plus prises en considération dans l'hypothèse d'un milieu continu ; cette loi exprime simplement la relation entre la vitesse fictive « macroscopique » (ou débit unitaire)  $q$  et le gradient hydraulique (ou pente piézométrique)  $J$ , par  $q = K \cdot J$  avec  $K$  = coefficient de Darcy (ou coefficient de perméabilité ou encore conductivité hydraulique)<sup>3</sup>.

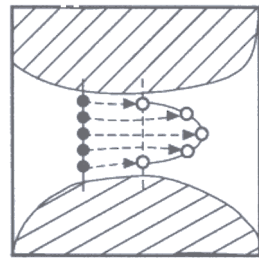
**Caractéristiques des paramètres d'un réservoir poreux**

Dans la mise en valeur d'un aquifère alluvial, il est nécessaire de mettre en parallèle deux préoccupations ; celle relative à l'étude quantitative de la ressource eau, où l'on traitera du mouvement de

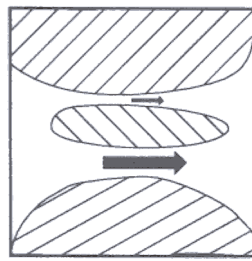
lors d'un essai de traçage *in situ*. Dans ces cas, vu l'extension du champ d'observation, il sera nécessaire de définir des grandeurs caractéristiques à cette échelle supérieure de niveau d'hétérogénéité d'ordre 2, voire 3. Ce ne seront plus les valeurs locales d'un VER, mais celles qui intègrent les « variations régionales » et devront être déterminées à l'aide de méthodes statistiques.

Figure 5

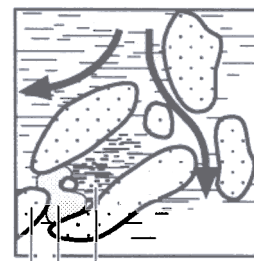
1. Effets de mécanismes dispersifs à l'échelle des volumes de pores (hétérogénéités d'ordre 1



a. Particules élémentaires soumises au profil des vitesses dans un conduit interstitiel

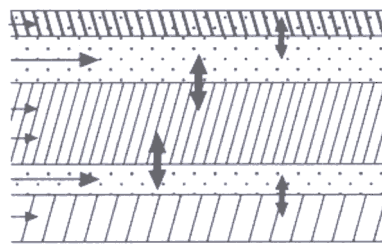


b. Dimension variable des pores

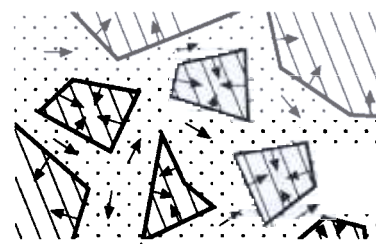


eau stagnante  
air (bulle piégée)  
grain de sable  
c. Présence d'une phase gazeuse avec formation d'eau immobile

2. Effets de mélange par circulation à travers des structures multi-perméables (hétérogénéités d'ordre 2)



a. Échange entre couches parallèles



b. Échange entre blocs répartis de façon aléatoire

Niveaux d'observation de circulations hétérogènes.

masses d'eau sans distinction de composition ; et celle relative à la quantité de l'eau. Dans le premier cas, on évaluera la capacité du réservoir poreux à contenir de l'eau et son aptitude à transmettre un flux d'eau ; dans le second cas, il s'agira d'apprécier la capacité du réservoir à sélectionner des éléments physiques, chimiques ou biologiques et son aptitude à disperser ces éléments dissous et (ou) en suspension. Dans cette optique, trois paramètres du réservoir sont à mettre en avant : la porosité, la perméabilité et la dispersivité. Leur importance se situe respectivement au niveau du contenu (stock d'eau), du flux (circulation de l'eau), de la propagation (transport par l'eau).

**La porosité**

Lors d'essais sur échantillon de milieu poreux quasi saturé en eau, le volume d'eau gravitaire recueilli rapporté au volume total de l'échantillon

indique la valeur de sa porosité efficace (correspondant à la teneur en eau drainable). Alors que cette porosité efficace s'obtient comme un rapport de deux volumes, la porosité cinématique s'obtient par le rapport de deux vitesses : vitesse de Darcy/vitesse macroscopique moyenne. Cette porosité cinématique (correspondant à la teneur en eau mobile) est-elle fonction du gradient de charge hydraulique ? Il n'est guère de mesure connue faite pour résoudre cette question. N'est-il pas risqué de vouloir déterminer cette porosité cinématique par traçage *in situ* au niveau d'une portion du réservoir, sachant que les hétérogénéités feront assimiler la vitesse macroscopique moyenne à la vitesse correspondant au transit par les zones plus perméables ? L'essai de traçage serait pertinent pour reconnaître ces chemine-ments par une porosité dite cinématique, sans commune mesure avec la valeur de la porosité totale du milieu.



### La perméabilité

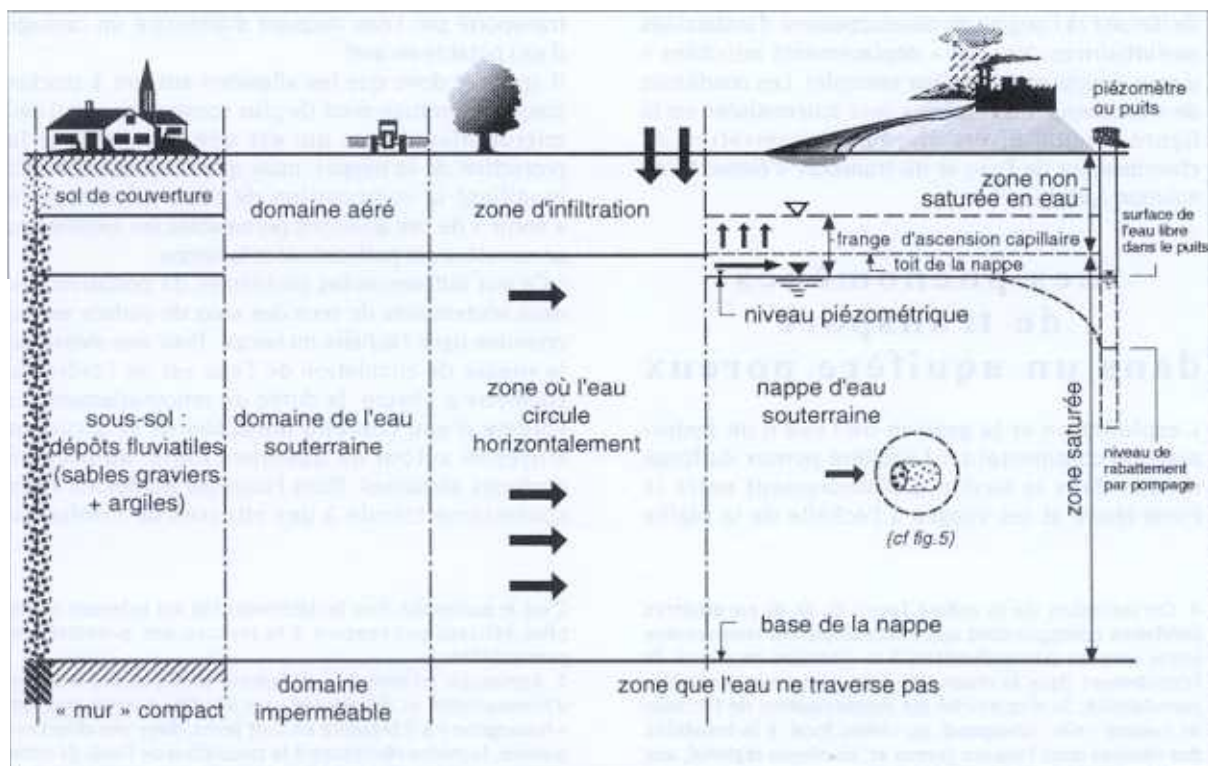
Rappelons, à partir de la loi de Darcy, que le coefficient de perméabilité  $K$  (ou conductivité hydraulique de dimension  $LT^{-1}$ ) dépend non seulement des caractéristiques sédimentologiques du réservoir poreux mais encore des caractéristiques physiques du fluide en circulation. On introduit ainsi la perméabilité  $k$  (grandeur spécifique au milieu poreux, de dimension  $L^2$ , encore appelée perméabilité intrinsèque) liée à  $K$  par la relation  $K = k \cdot r \cdot g/m$  où  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  $r$  et  $m$  étant respectivement la masse volumique et la viscosité dynamique du fluide en circulation. Dans les milieux alluviaux (empilement de sédiments), on note toujours des valeurs de la perméabilité horizontale bien supérieures à celles de la perméabilité verticale (en fait, dans un tel volume aquifère, la perméabilité est à considérer en général comme une propriété tensorielle). La connaissance des valeurs locales de la perméabilité à différentes cotes de profondeur d'un réservoir permet d'en apprécier l'hétérogénéité. Il n'est cependant pas sûr que l'on puisse toujours tirer parti de cette connaissance pour prévoir le comportement global du réservoir. Dans certains cas, on utilisera la notion de transmissivité de la nappe qui correspond, sur une verticale, au produit de la conductivité hydraulique horizontale moyenne par

l'épaisseur de la nappe, encore appelée sa puissance. La composition des perméabilités « locales » pour déterminer une perméabilité « régionale » qui traduit « en moyenne » la distribution des hétérogénéités d'un aquifère, ne s'opère rigoureusement que dans les cas simples du réservoir stratifié à succession de couches parallèles ou perpendiculaires à l'écoulement d'eau. Cette situation est certainement à l'origine de la mise en œuvre croissante de démarches stochastiques à côté d'approches déterministes ; courante en hydrologie, cette méthodologie se développe en hydrogéologie pour prendre en compte la variabilité spatiale aléatoire de paramètres caractéristiques. La même analyse sur l'hétérogénéité d'un réservoir que celle effectuée à partir de perméabilités locales et régionales se retrouve dans la caractérisation des propriétés dispersives du réservoir.

### La dispersivité

Dans un aquifère de type alluvial, le transport d'un traceur (substance miscible à l'eau sans en modifier les caractéristiques physiques et non interactive avec les alluvions) d'un puits d'émission à un puits de repérage permet d'accéder à un coefficient de dispersion à partir de la courbe de restitution donnant la répartition des concentrations en traceur dans le temps au puits de

Figure 6



Coupe schématique d'un aquifère poreux (avec essai de terminologie adaptée à l'interdisciplinarité).

mesure. (Les méthodes de traçage pratiquées sur le terrain se trouvent dans une littérature abondante sur le sujet. Pris selon la direction de l'écoulement moyen de l'eau souterraine, ce coefficient, noté  $D_L$  et appelé coefficient de dispersion longitudinal (de dimension  $L^2T^{-1}$ ), s'exprime en général par la relation  $D_L = -\alpha_L \cdot u^m$ , où  $u$  est la vitesse macroscopique moyenne de l'écoulement (rapport du débit unitaire à la porosité cinématique du milieu), où  $m$  est une constante prise égale à 1 dans les conditions de circulation de l'eau dans un aquifère alluvial et où  $\alpha_L$  est un coefficient de dispersion longitudinal intrinsèque appelé dispersivité longitudinale<sup>4</sup>.

## Les conditions d'écoulements hétérogènes

La connaissance globale des contours de l'aquifère et la détermination de paramètres sur certains sites ne lèvent pas les incertitudes quant à la variabilité des grandeurs dans l'espace. Cette variabilité se manifeste au vu des résultats de mesures des vitesses locales sur un site de l'aquifère rhénan par mise en œuvre de la méthode de dilution ponctuelle. Il s'agit également d'élargir dans ce contexte la notion d'hétérogénéité au-delà des effets dus à la structure sédimentologique (créatrice de cheminements préférentiels comme de zones à diffusion retardée par exemple). Il s'agit encore de prendre en considération l'influence de zones à saturations différentes (effets capillaires en écoulement polyphasique, piégeage d'eau en aquifère aéré notamment), ainsi que l'incidence de contrastes de densité (à l'origine du développement d'instabilités perturbatrices dans les « déplacements miscibles » d'eaux douces et salées, par exemple). Les conditions de « circulation hétérogène » sont schématisées sur la figure 5 selon divers niveaux d'observation du cheminement de l'eau et du transport d'éléments en solution dans l'eau<sup>5</sup>.

## Les phénomènes de transport dans un aquifère poreux

L'exploitation et la gestion de l'eau d'un hydro-système continental tel l'aquifère poreux du fossé rhénan dans le bassin d'effondrement entre la Forêt-Noire et les Vosges à l'échelle de la plaine

4. On introduit de la même façon  $D_T$  et  $\alpha_T$ , paramètres similaires correspondant aux effets dispersifs transversaux (dans un plan perpendiculaire à la direction moyenne de l'écoulement dans le réservoir). Tout comme le paramètre perméabilité, la dispersivité est représentative de l'échelle de mesure : elle correspond, au niveau local, à la variabilité des vitesses dans l'espace poreux et, au niveau régional, aux hétérogénéités du champ des vitesses macroscopiques représentatif de la nature sédimentologique du réservoir.

alluviale, doivent prendre en compte à la fois l'eau atmosphérique, les eaux de surface, l'eau du sol et les eaux souterraines (c'est le cas dans toute vallée fluviale). Afin de quantifier le transport de substances chimiques polluantes vers (et dans) les eaux souterraines, il faut non seulement connaître l'aptitude du milieu (couvertures pédologiques et systèmes racinaires, dépôts sédimentaires et alluvions, avec leurs biocénoses spécifiques) à transmettre un flux d'eau, mais savoir prendre en compte la capacité de ce milieu poreux à sélectionner les éléments véhiculés par l'eau, à les disperser ou à les fixer, voire encore à les transformer (processus biologiques et chimiques). Les éléments ci-dessous indiquent comment la nappe alluviale libre (nappe phréatique) se situe dans le système interactif global.

- Entre les rivières en surface et la nappe souterraine se produisent des échanges d'eau variables en quantité selon les saisons, les secteurs, l'hydraulicité des rivières et la position relative de la surface de la nappe et de celle du fond du lit des cours d'eau.

- Les alluvions en contact avec la nappe ne sont pas inertes au passage de polluants. Ainsi les sédiments des cours d'eau et les éléments fins (argiles et limons) de l'aquifère « réagissent » avec des contaminants toxiques tels des traces de métaux lourds ou des pesticides (micropolluants inorganiques ou organiques). Des expériences sur milieux poreux en laboratoire ont montré que dans certaines conditions (par exemple un changement de la composition de l'eau), un micropolluant comme le mercure peut être remobilisé après fixation et transporté par l'eau risquant d'atteindre un captage d'eau potable en aval.

Il apparaît donc que les alluvions arrivent à stocker jusqu'à un certain seuil (le plus souvent inconnu) des micropolluants (ce qui est une chance pour la protection de la nappe), mais que d'autres éléments modifiant la composition de l'eau peuvent faire « sortir » de ces alluvions perméables les substances accumulées qui polluent alors la nappe.

- Ce qui différencie les problèmes de pollution des eaux souterraines de ceux des eaux de surface est en première ligne l'échelle du temps. Pour une rivière où la vitesse de circulation de l'eau est de l'ordre du kilomètre à l'heure, la durée de renouvellement du volume d'eau contenu dans son lit se situe en moyenne autour de quelques jours, au plus de quelques semaines. Dans l'aquifère poreux où l'eau souterraine circule à des vitesses de l'ordre du

C'est le paramètre dont la détermination sur le terrain est la plus délicate par rapport à la mesure des porosités et perméabilités.

5. Remarque relative à la définition pratique des notions d'homogénéité et d'isotropie : un aquifère poreux sera dit « homogène » s'il présente en tout point, dans une direction donnée, la même résistance à la circulation de l'eau. Si cette résistance est la même quelle que soit la direction, l'aquifère sera dit « isotrope ».

kilomètre à l'année, l'indicateur de la durée du renouvellement du volume d'eau contenu dans le réservoir s'exprime en décennies, voire en siècles. Par sa propagation rapide, la pollution d'un cours d'eau (dont les effets sont visibles le plus souvent) est susceptible d'être vite détectée. En revanche, la pollution d'une eau souterraine (circulant très lentement et quasi visible dans le compartiment souterrain) peut voir sa détection différée de plusieurs années et même au-delà. Dès lors, les « temps de réaction » sont du même ordre lorsqu'il s'agit de dépolluer. Après l'arrêt de la source de pollution et la mise en œuvre de techniques d'assainissement, la qualité originelle de l'eau de rivière sera retrouvée après un délai relativement court. Réduire la pollution dans le réservoir aquifère nécessitera des dizaines d'années. Dans des cas extrêmes, la situation peut même devenir irréversible.

Cette notion d'irréversibilité est en soi complexe car elle relève de critères de classification par familles de pollutions. De plus, la « persistance » d'une pollution est une notion liée à la nature et au degré d'intensité de toutes les interrelations, variables en durée, entre compartiments hydrologiques et écosystèmes associés d'un bassin fluvial. La connaissance fine de la dynamique de transfert de polluants vers les nappes est encore fragmentaire. Un tel transfert est fonction à la fois de la spécificité du milieu traversé, du type de polluant et des conditions de son transport par l'eau.

- En ce qui concerne la caractérisation du site de transfert vers la nappe, il s'agit de distinguer entre deux types « d'écrans » ou « barrière biogéochimiques » : soit des sols secs (en surface) ou inondés, avec ou sans couvert végétal, présentant des conditions hydriques très variées ; soit des sédiments, dépôts colmatant dans les cours d'eau, étangs, ballastières, en état de saturation en eau maximale.

Ces milieux poreux ne sont le plus souvent décrits qu'en fonction d'une problématique intéressant une seule discipline scientifique et à une échelle donnée.

L'état actuel des connaissances quant à leur structure in situ et leur rôle en tant que milieux « actifs » (fonctionnement interne d'écotones hétérogènes) dans le transfert des polluants est insuffisant.

Un classement par famille de polluants peut être fait selon des critères d'ordre :

- physique (miscibilité totale ou partielle à l'eau, volatilité, ...);
- chimique (nature minérale ou organique, solubilité, ...);
- biologique (taux de dégradation, degré de toxicité, ...).

Si l'on connaît intrinsèquement ce type de données, pour telle ou telle substance dans des conditions précises d'analyses et de mesures, on ne dispose guère de leur connaissance complète dans les conditions de circulation en milieu poreux naturel. Le transport par l'eau comprend l'hydrodynamique et

les processus réactionnels. Les substances contaminantes (sous forme particulaire ou en solutés) présentent des « affinités » différenciées vis-à-vis de la matière solide ou des phases fluides (eau et air) formant le milieu naturel de transfert.

Des essais (« statiques ») en réacteurs fermés permettent généralement d'accéder à des équilibres dans la répartition d'un élément entre phase solide et fluide. Dans ces conditions « dynamiques », où les flux de polluants sont variables, l'échange se produit différemment : il est utile de développer l'expérimentation pour accéder à une meilleure connaissance des mécanismes d'échange et des équilibres susceptibles d'être atteints ou non en fonction de la nature et du comportement spécifique des polluants.

Les processus réactionnels (chimiques et biologiques), plus intenses dans le domaine aéré du réservoir aquifère (zone « écotone » subsistant de plus les effets de la densité racinaire dans sa partie supérieure), sont sous l'influence de nombreux facteurs « environnants » (pH, température, spéciation, présence d'autres substances colloïdes, matière organique, ...).

Les échanges peuvent être réversibles ou non ; les cinétiques également sont différentes et liées aux conditions de transport (vitesses de circulation). Enfin, la position relative du toit de la nappe par rapport à la surface du sol est déterminante : l'infiltration est d'autant plus rapide que le milieu poreux est davantage saturé en eau. Quantifier le transfert nécessite d'introduire une hiérarchisation dans les mécanismes physiques et dans les processus, chimiques et biologiques qui le gouvernent. Une recherche expérimentale d'ampleur est à mener pour mieux appréhender cette hiérarchisation qui doit permettre d'aboutir à des modèles prévisionnels praticables par les gestionnaires de la qualité des eaux. L'identification des discontinuités d'écotones eaux souterraines-eaux de surface entre pour une part importante dans les stratégies d'aménagement intégrant l'hydrologie opérationnelle et la biologie.

L'analyse des « flux de pollution » résultant de nombreuses activités humaines - domestiques, agricoles ou industrielles - est complexe. La prise en compte de leur dynamique d'évolution complétée par l'examen - à diverses échelles d'espace et de temps - de l'accumulation dangereuse de polluants toxiques dans tous les compartiments d'un hydrosystème alluvial, repose sur la connaissance de nombreux mécanismes et processus. La compréhension d'un certain nombre de ces mécanismes élémentaires ainsi que de leurs interactions permettent de développer des représentations par modèles dans l'optique d'une « prévention active ».

Dans la protection des eaux souterraines, les technologies curatives nécessaires seront développées pour répondre aux situations accidentelles. On peut noter que là plupart des contaminations d'un système alluvial sont le fait de polluants miscibles à

l'eau. Même dans le cas d'une pollution par produits pétroliers, c'est la fraction d'hydrocarbures solubles qui constitue le danger essentiel car elle se propage avec la mobilité de l'eau, le « vecteur de propagation » étant l'eau.

Le mouvement du polluant sera soumis à l'action de « retardateurs du transport » que sont les phases solide, liquide ou gazeuse « stationnaires » et réactives. L'utilisation de connaissances en géochimie, en hydrogéologie et en mécanique des fluides est alors nécessaire.

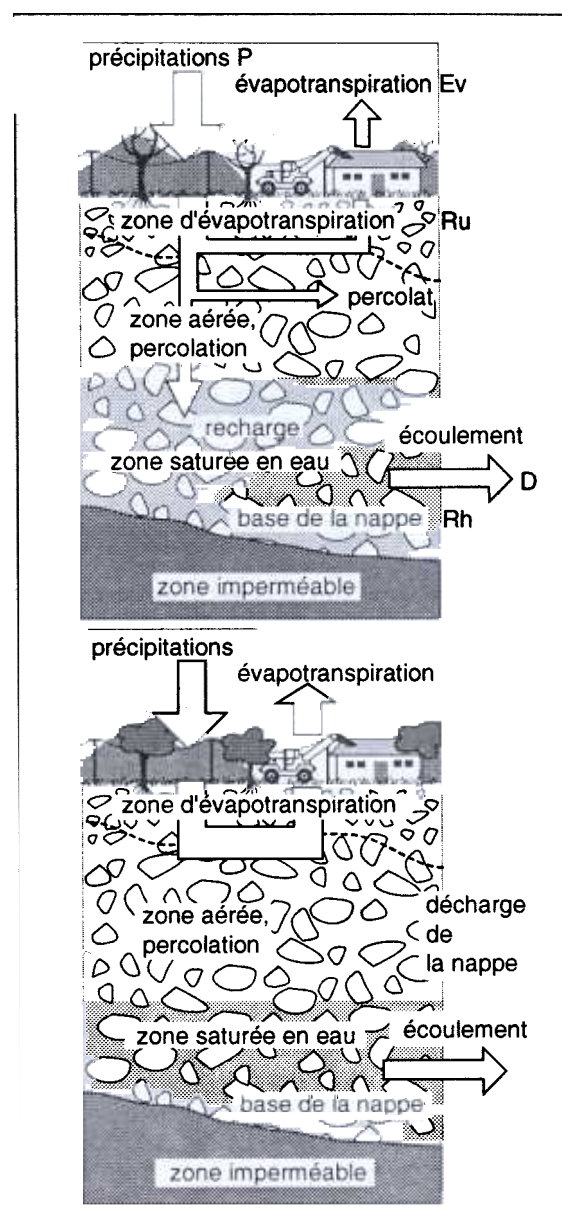
Pendant son déplacement, la pollution sera également sous l'influence de « biotransformateurs des polluants ». L'analyse de telles « perturbations » relève de l'écologie, de la microbiologie (ou encore de la toxicologie pour les effets sur le vivant). L'accès à cette « vision » des mécanismes, aussi complète que possible, est nécessairement interdisciplinaire.

## Alimentation des nappes phréatiques

La pluie qui pénètre dans le sol s'y infiltre. Une partie de l'eau est retenue dans une couche superficielle colonisée par les racines : la réserve utile à la végétation. L'eau en est surtout extraite par la transpiration des végétaux, l'évaporation du sol n'asséchant qu'une faible épaisseur. L'évapotranspiration est à la fois la transpiration des végétaux et l'évaporation du sol. Cette réserve utile est limitée : elle dépend de la nature du sol et de la profondeur atteinte par les racines (voir le dossier

n° 8 « Interaction climat-végétaux »). Ce n'est que lorsqu'elle est reconstituée que l'eau contribue au remplissage des nappes et aux écoulements. La réserve utile (Ru) comprend deux réservoirs : l'un totalement accessible à l'évapotranspiration, la réserve facilement utilisable (Rfu), l'autre, la réserve de survie des végétaux (Rs). Lorsque le réservoir est en régime réserve de survie, les végétaux réduisent leur transpiration par fermeture des stomates et diminution des forces de capillarité. La réserve utile

Figure 7



Alimentation de la nappe phréatique en hiver et en été.

Décor des panneaux avant de la manipulation  
« Comment sont alimentées les nappes phréatiques ? »

### La nappe phréatique du Fossé rhénan

L'eau de cette nappe phréatique, dans son extension géographique de Bâle à Mayence, est la ressource d'eau potable la plus importante d'Europe. Sa capacité est de l'ordre de trois cents milliards de mètres cubes d'eau douce. Globalement, la base de la nappe coïncide avec le toit des marnes oligocènes imperméables et sa surface se situe en moyenne à quelques mètres sous le niveau du sol. L'allure générale de la surface piézométrique ressemble à celle d'un système simple qui comporterait une géométrie en forme de gouttière avec une alimentation latérale et un exutoire axial au nord. La pente moyenne de cette surface piézométrique est de l'ordre de 1‰. L'eau souterraine, contenue dans les alluvions (mélange de galets, graviers, sables et argiles) formant le « réservoir aquifère », circule à très faible vitesse selon l'axe tracé par le Rhin du sud au nord. La vitesse moyenne réelle de l'écoulement est de 3 m/j à 8 m/j, soient des vitesses de l'ordre du km/année, l'indicateur de la durée de renouvellement du volume d'eau contenu dans le réservoir s'exprime en décennies, voire en siècles. Le comportement de la nappe phréatique est étroitement lié à celui du réseau de surface (Rhin, rivières, canaux...) qui joue un rôle régulateur du niveau piézométrique.



du sol représente le seuil de saturation du sol au-delà duquel tout excédent de pluie est disponible pour l'écoulement et la percolation (pluie efficace). La pluie efficace est la part de la pluie disponible à l'infiltration ; elle comprend la recharge et le percolat. La recharge est la fraction de la pluie efficace qui fait remonter la ligne piézométrique de la nappe et, quand le niveau de la nappe reste constant, elle se stabilise. Le percolat est l'excédent de pluie par rapport à  $R_{fu}$  non encore parvenu à la nappe. La percolation commence lorsque l'eau disponible moins l'évapotranspiration excède  $R_{fu}$ .

En climat tempéré et, plus encore, en climat méditerranéen, la quantité d'eau emmagasinée dans la réserve utile des plantes est faible (elle suffit rarement aux besoins d'évaporation des plantes l'été). Les arbres, plus profondément enracinés que les autres types de végétation, disposent d'une réserve plus importante et évaporent davantage : le volant constitué par cette réserve réduit l'écoulement.

Ainsi, dans les régions où le sol est assez épais pour que les racines des arbres s'enfoncent profondément, la forêt réduit l'écoulement annuel lorsque les pluies d'hiver alimentent suffisamment la réserve utile et que celle-ci est sollicitée pendant l'été.

La sécheresse des sols (pédologique) qui aboutit à un déficit en alimentation en eau des plantes (cultivées ou non) dépend des pluies d'été. La sécheresse des cours d'eau et des nappes phréatiques (hydrologique) dépend des pluies d'hiver. Ces deux types de sécheresse sont indépendantes, sauf irrigation qui puise dans la nappe pour alimenter les sols. En hiver, si les pluies sont supérieures à l'évaporation les réserves se reconstituent :

$R_h = P - R_u - E_v - D$ , avec  $R_h$  = réserve hydrologique,  $R_u$  = réserve utile,  $E_v$  = évapotranspiration,  $D$  = écoulement de la réserve constituée pendant l'hiver.

En été, si les pluies sont inférieures à l'évaporation, les réserves s'épuisent :

$$E_v = R_u + P.$$

## 2 Description des manipulations

Les deux manipulations de ce dossier « Comment sont alimentées les nappes phréatiques » et « Comment un polluant se déplace dans l'eau souterraine » sont essentiellement des dispositifs de visualisation.

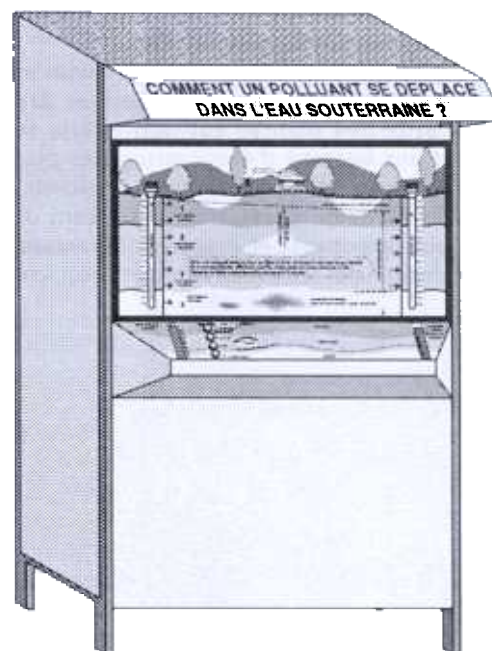
### Comment un polluant se déplace dans une nappe phréatique ?

Au Laboratoire d'hydrodynamique des milieux poreux de l'Institut de mécanique des fluides de Strasbourg, un de ces outils est le modèle physique de milieu poreux qui est utilisé dans la manip de ce dossier. Il permet de visualiser la circulation d'eau et de polluants dissous à travers les vides existants entre les grains empilés d'un milieu perméable de type sables et graviers. Le chercheur approche ainsi la réalité physique des mécanismes à étudier tout en les « transposant » à l'échelle du laboratoire. L'objectif est de comprendre le mouvement de liquides visualisé par un traceur en examinant ce qui se passe dans une tranche verticale de milieu poreux, dans l'axe de l'écoulement. Ces modèles, simples d'abord (matrices homogènes et isotropes) conservent la structure naturelle de l'interconnexion des pores et, cela est essentiel, plus élaborés, ils représenteront des configurations générales ou locales relatives à l'anisotropie des perméabilités dont l'influence sur l'anisotropie de propagation et de dispersion sera visible directement et mesurable.

La tranche de milieu poreux d'épaisseur 20 mm est contenu dans un parallélépipède dont les parois sont en altuglas d'épaisseur 20 mm, pour résister à la pression interne.

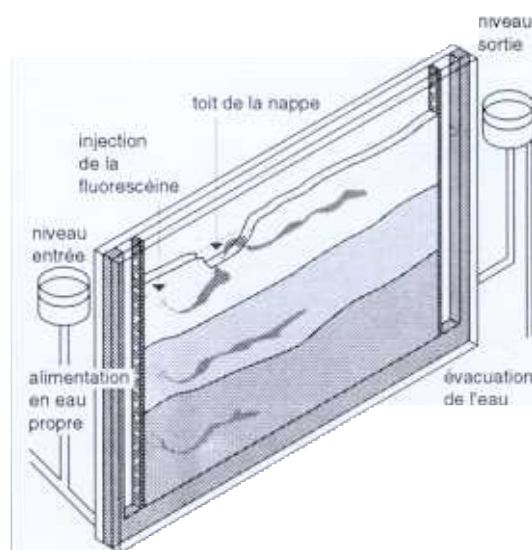
Le remplissage de sable et de gravier se fait en couches (fig. 9 et 10). Dans la partie basse, on réalise une couche en sable fin. Au-dessus on dépose une couche constituée de sable plus gros. En son sein on a placé une hétérogénéité sous la forme d'une olive en sable fin. Enfin la dernière couche est réalisée avec un mélange de sable et de gravier. Dans cette dernière couche, on a creusé deux gravières. Du grillage de tamis maintient en forme le mélange sable plus gravier. Sans ce dispositif le matériau serait entraîné par le courant d'eau, et en s'écroulant, il remplirait la gravière. Notons qu'à l'entrée et à la sortie de l'eau dans la tranche on utilise, pour les mêmes raisons, un filtre en tissu soutenu par une plaque percée de trous (fig. 14).

Figure 8



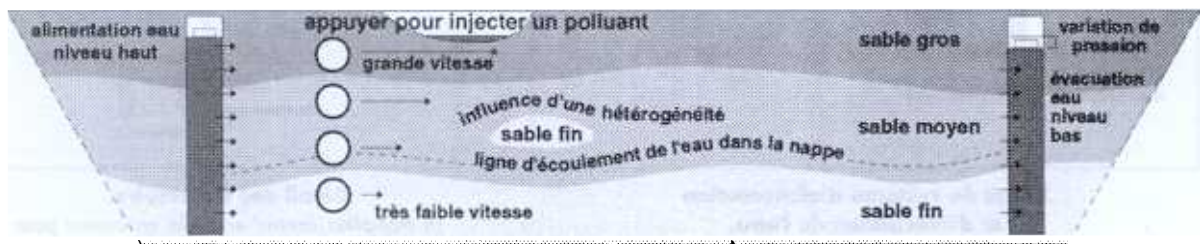
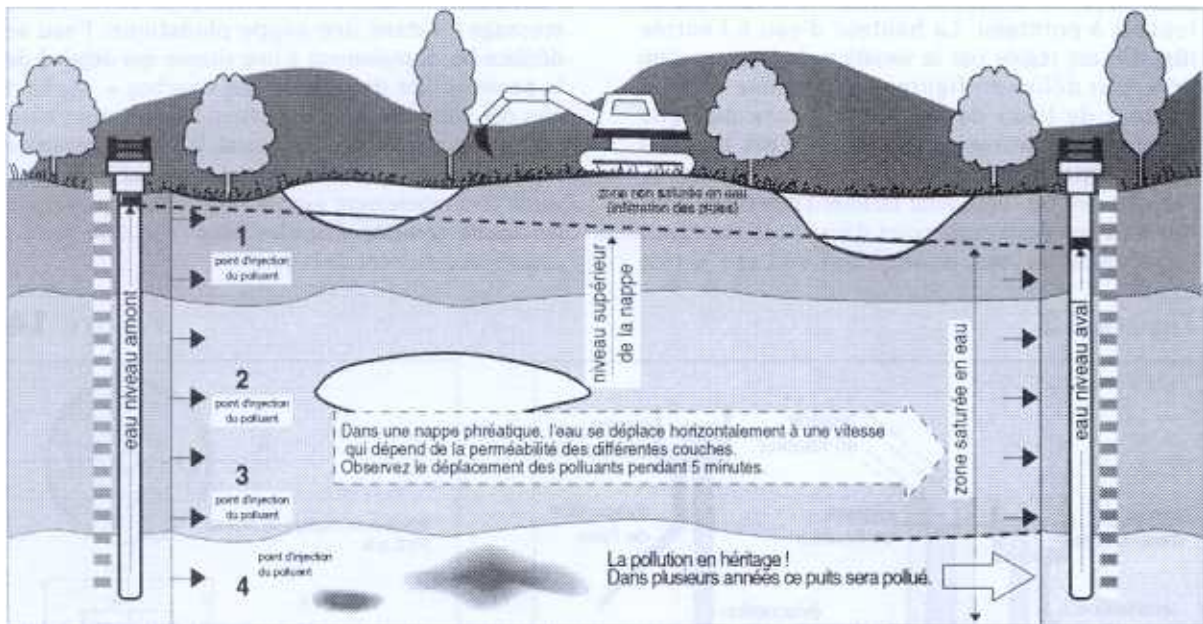
Vue générale.

Figure 9



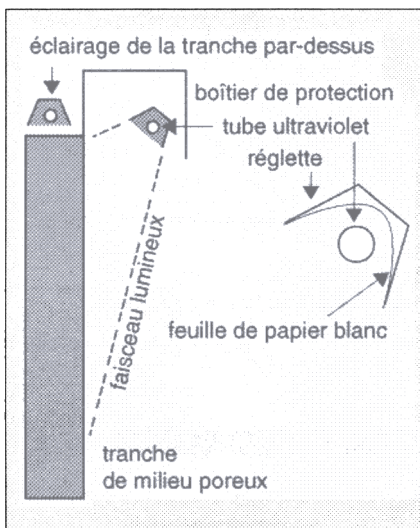
Cuve contenant la tranche de milieu poreux.

Figure 10



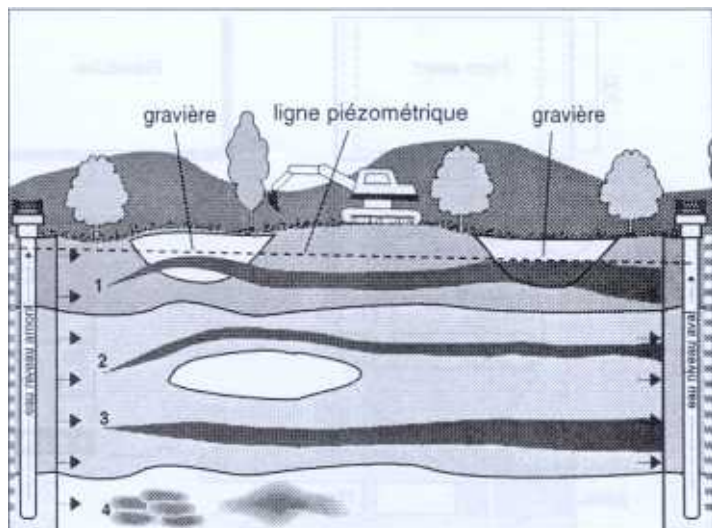
Panneaux avant.

Figure 11



Détail de l'éclairage par ultraviolet.

Figure 12



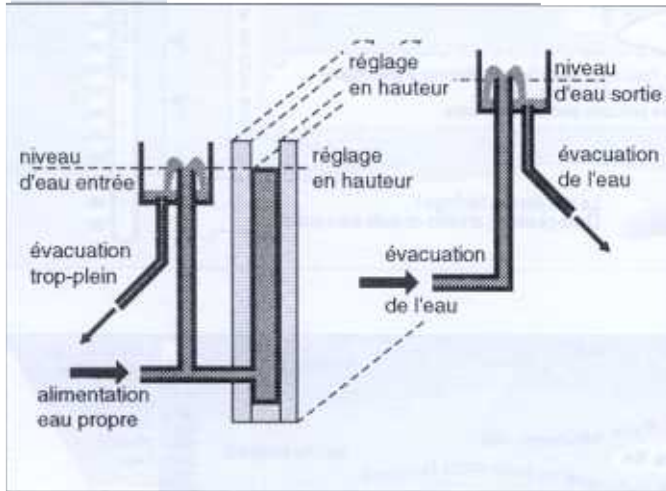
Déplacements des files de fluorescéine, influence des hétérogénéités.



Pour l'alimentation en eau du réseau, on diminue la pression par un détendeur et on limite le débit par un robinet à pointeau. La hauteur d'eau à l'entrée (fig. 13) est réglée par la variation de hauteur d'un déversoir défini en figure 14. De même pour la hauteur de l'eau de sortie. La pente de ligne piézométrique définie par la différence des hauteurs entrée-sortie détermine la vitesse et la direction de l'écoulement de l'eau. Pour faciliter l'itinérance dans des lieux non équipés de point d'eau, nous avons mis un réservoir qui sert de recyclage de l'eau. Il faut

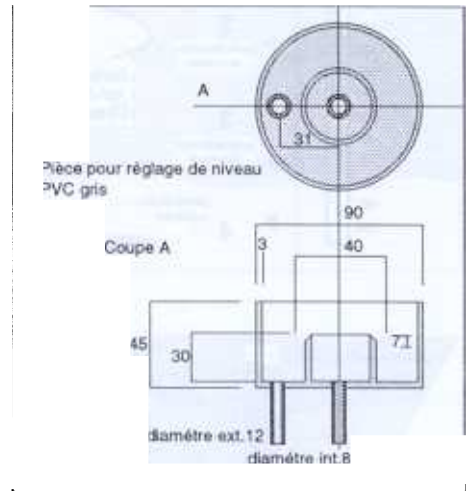
choisir une pente qui conserve à peu près l'horizontalité de l'écoulement pour renforcer le message : « dans une nappe phréatique, l'eau se déplace horizontalement à une vitesse qui dépend de la perméabilité des différentes couches », sachant que par suite des hétérogénéités l'écoulement n'est pas systématiquement horizontal. Il est nécessaire de renouveler l'eau au moins une fois par jour, car elle se verdit très rapidement avec la fluorescéine qui simule les agents polluant miscibles dans l'eau. Une pompe assure l'écoulement de l'eau.

Figure 13



Détail du système d'alimentation et d'évacuation de l'eau.

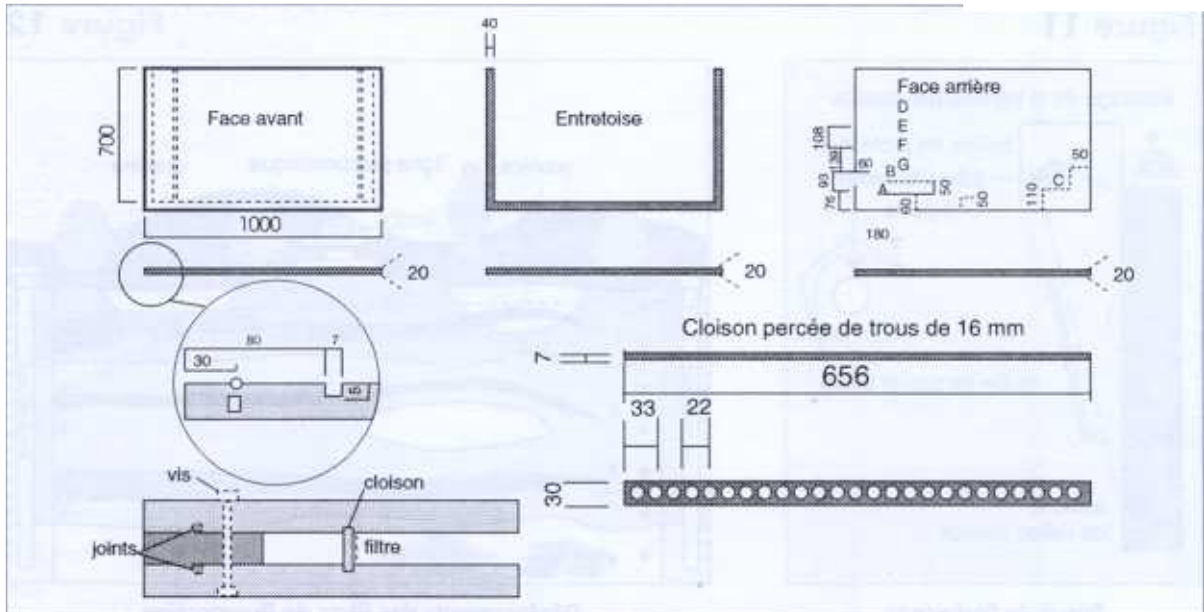
Figure 14



Détail des déversoirs.

Le trop-plein central est taillé en biseau pour respecter la hauteur. La hauteur de ces déversoirs est réglable avec une fixation par vis papillon sur le support fixe.

Figure 15



Détails des pièces de la cuve.



Les visiteurs, en appuyant sur l'un des quatre boutons du panneau de la console (fig. 10), injectent de la fluorescéine pendant un temps très court pour éviter une trop grande quantité de ce produit. Néanmoins, cette quantité doit être suffisante pour une bonne visualisation du phénomène. Pour cela, on utilise une pompe doseuse dont la durée de fonctionnement est limitée par une temporisation réglable. La distribution du produit aux quatre points d'injection se fait avec quatre électrovannes (fig. 16). La fluorescence de la fluorescéine est provoquée par un éclairage ultraviolet (Mazdafluor lumière noire). Pour le réflecteur, les meilleurs résultats ont été obtenus avec une feuille de papier extrablanc (fig. 11).

### Les effets des hétérogénéités

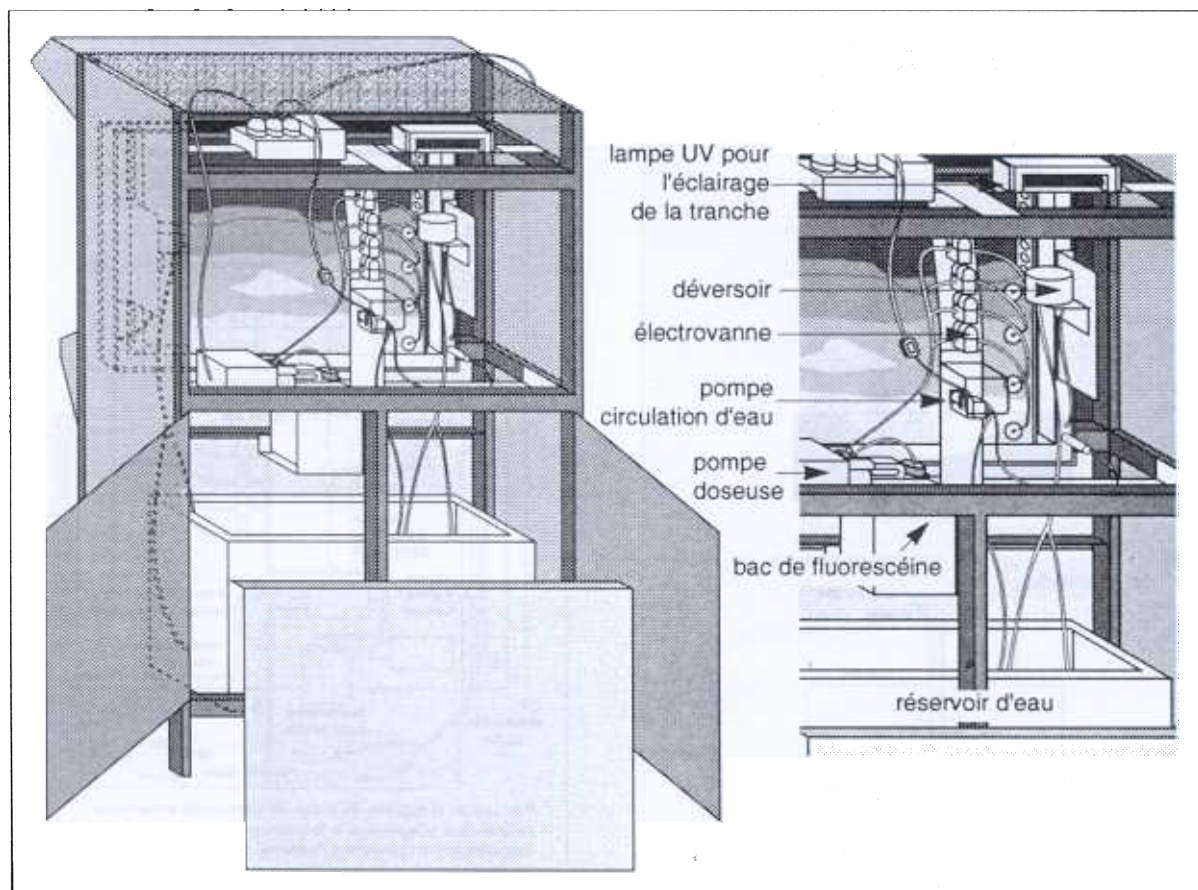
- Le filet de fluorescéine du point d'injection 1 remonte lorsqu'il entre dans la gravière et redescend lorsqu'il en ressort. Nous avons placé une deuxième gravière pour montrer que la fluorescéine qui, par dispersion, n'est plus visible continue de s'écouler dans le milieu poreux.
- Le filet du point d'injection se trouve dévié par l'olive

de plus faible perméabilité ; en revanche, celui qui vient du point 3 ne subit pas cette variation. Le filet du point 4 s'écoule très lentement à cause de la très faible vitesse du fluide et il est rapidement dispersé.

### Améliorations

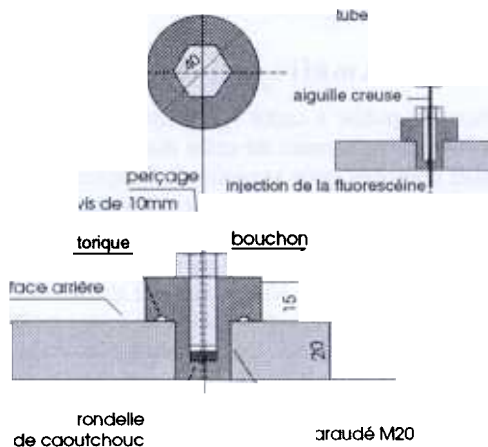
En dehors du public « captif », les visiteurs se désintéressent trop rapidement de cette manip, ils ne sont pas assez sollicités pour approfondir l'exploration de toutes les informations que contient cette visualisation. On peut jouer sur plusieurs paramètres. La longueur de la tranche est trop grande et la visibilité du traceur diminue très rapidement. Afin de montrer que le traceur continue de circuler, il faut monter une loupe mobile dans les deux dimensions. Ce dispositif encourage le visiteur à balayer toute la surface de la tranche. On peut aussi diminuer la longueur du bassin ou introduire des dispositifs comme des puits pour rendre à nouveau visible la fluorescéine. On peut placer un puits où l'on extrait de l'eau pour les usages domestiques. D'autre part, on peut réduire le nombre de points d'injection en supprimant le point d'injection n° 3.

Figure 16



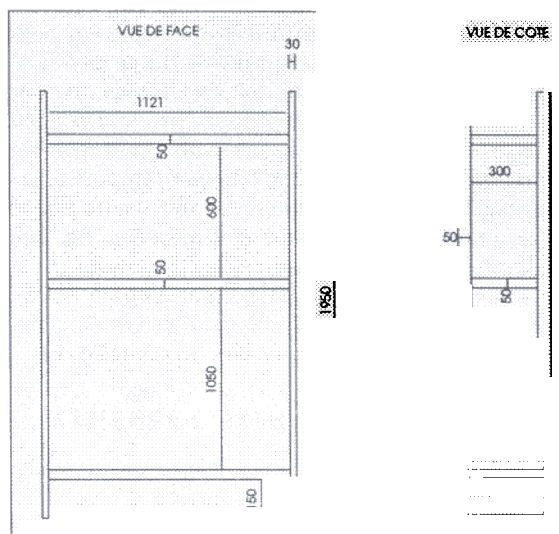
Vue arrière.

Figure 17



Détail du dispositif d'étanchéité au niveau des aiguilles de seringue pour l'injection de la fluorescéine dans le milieu poreux.

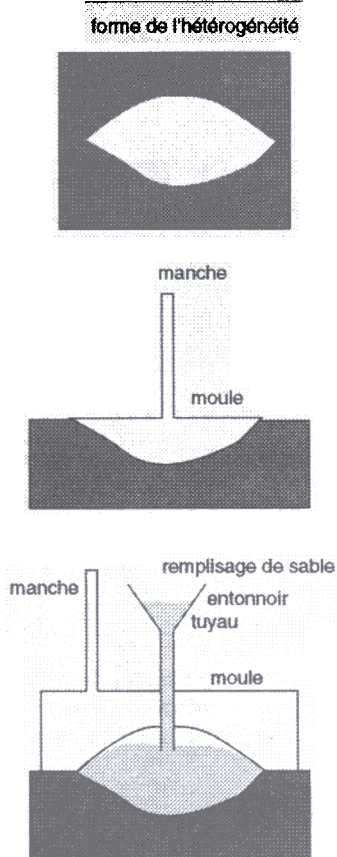
Figure 18



Détail de la structure porteuse.

202

19



Technique d'obtention de certaines formes en sable.

20

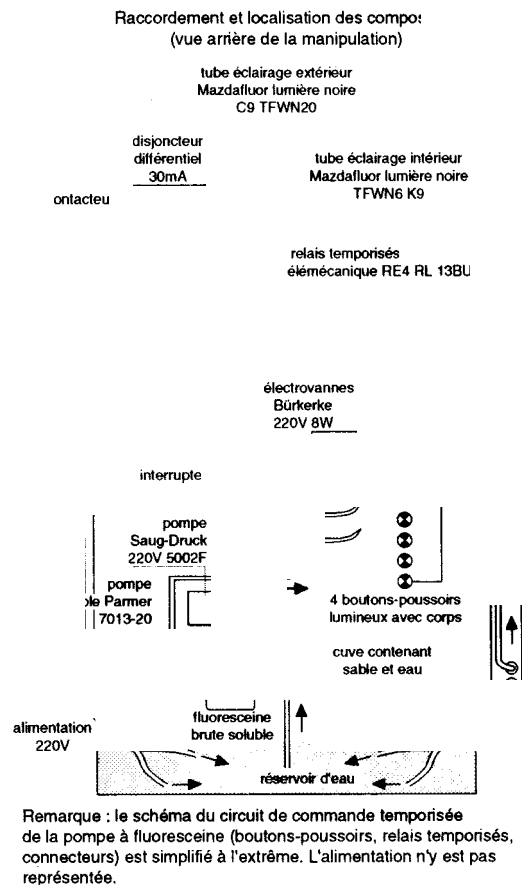
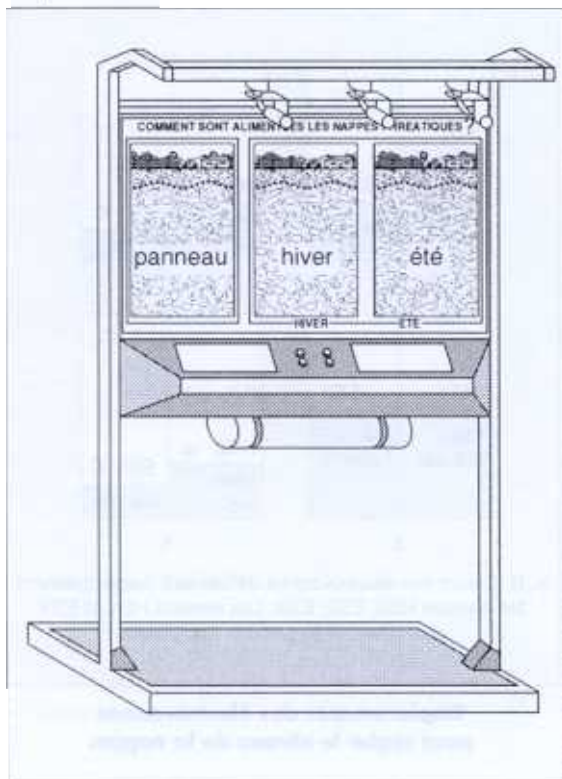


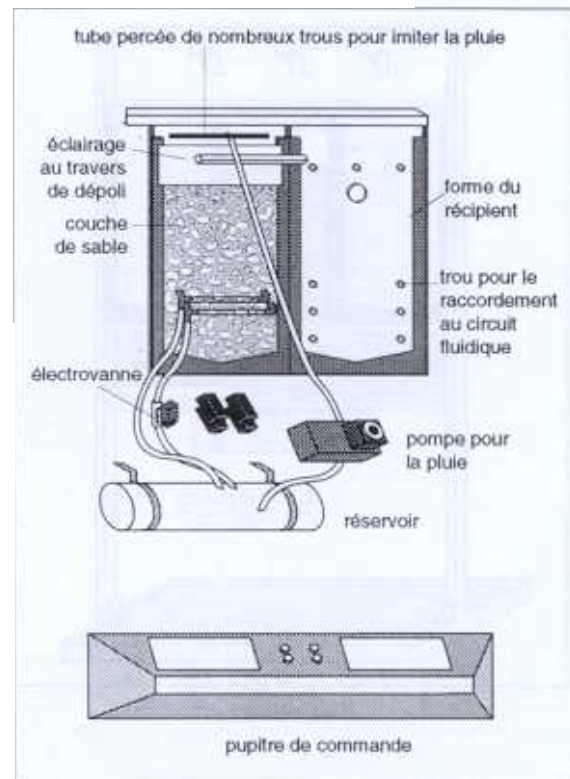
Schéma électrique.

Figure 21



Vue générale.

Figure 22



Éléments de la manipulation.

## Comment sont alimentées les nappes phréatiques ?

Faute de temps, nous n'avons pas pu terminer cette manip, notamment le dispositif de pluie. Nous avons montré la faisabilité du dispositif du réglage de la décharge de la nappe, dont on présente ci-dessous les détails techniques. L'interactivité de la manip réside dans la présence des quatre boutons. À chaque bouton correspond une situation :

1. hiver humide, été sec ;
2. hiver sec, été sec ;
3. hiver et été humides ;
4. hiver sec, été humide.

À chacune de ces situations est associé un niveau de la nappe phréatique dans chaque « bassin » hiver et été. Les sols sont représentés par des graviers de différentes tailles selon les strates et l'écoulement de l'eau est visualisé grâce à un liquide silicone<sup>6</sup> coloré en bleu qui est injecté à l'aide d'une pompe et d'électrovannes commandées par des interrupteurs, via une logique de relais. Lorsque le visiteur appuie sur le bouton 1 (hiver humide, été sec), il déclenche l'alimentation de la nappe par des gouttelettes (pluies). Cette eau

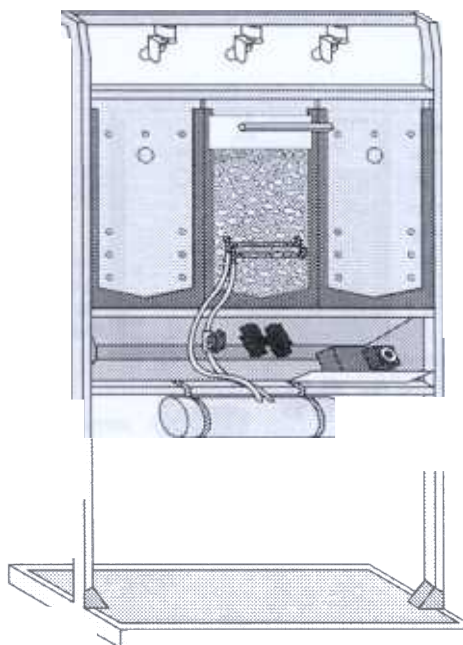
remplit la zone d'évaporation qui, après avoir atteint le niveau haut, alimente la nappe (hiver humide). On montre l'évapotranspiration par une pompe qui remonte l'eau vers le ciel. En hiver humide, la recharge de la nappe est limitée par le haut HS1 (fig. 23). Après le remplissage de la tranche en hiver vient celui de la nappe en été. Comme l'été est sec, les pluies suffisent seulement à compenser l'évapotranspiration. La nappe ne reçoit pas de recharge et son niveau s'abaisse pour atteindre le niveau intermédiaire ES2. Si l'hiver est sec (niveau HS2), la nappe en été parviendra au niveau (ES3). La commande des électrovannes est décrite en figure 24. Les deux cuves possèdent des tuyaux de communication entre la zone d'évaporation et la zone saturée pour satisfaire aux différents régimes. Néanmoins, dans le cas de la recharge, il faut que le fluide passe au travers de la zone de percolation. Notons que si l'on recommence immédiatement la même alimentation, on montre le principe d'inondation par saturation en eau des sols.

6. L'huile silicone doit posséder une faible viscosité (diminution des frottements pendant l'écoulement) et être colorable avec du bleu de méthylène, par exemple. Il faut laver le sable pour enlever la poussière qui, sinon, colmaterait les canalisations ou la pompe.

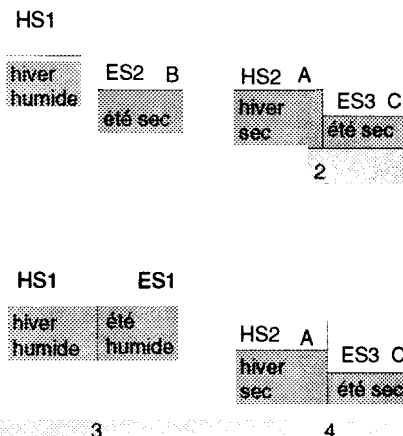


23

24



Vue arrière.



A, B, C sont des électrovannes définissant respectivement les niveaux HS2, ES2, ES3. Les niveaux HS1 et ES1 sont déterminés par des trop-pleins.

Emplacements des électrovannes pour régler le niveau de la nappe.

204

25

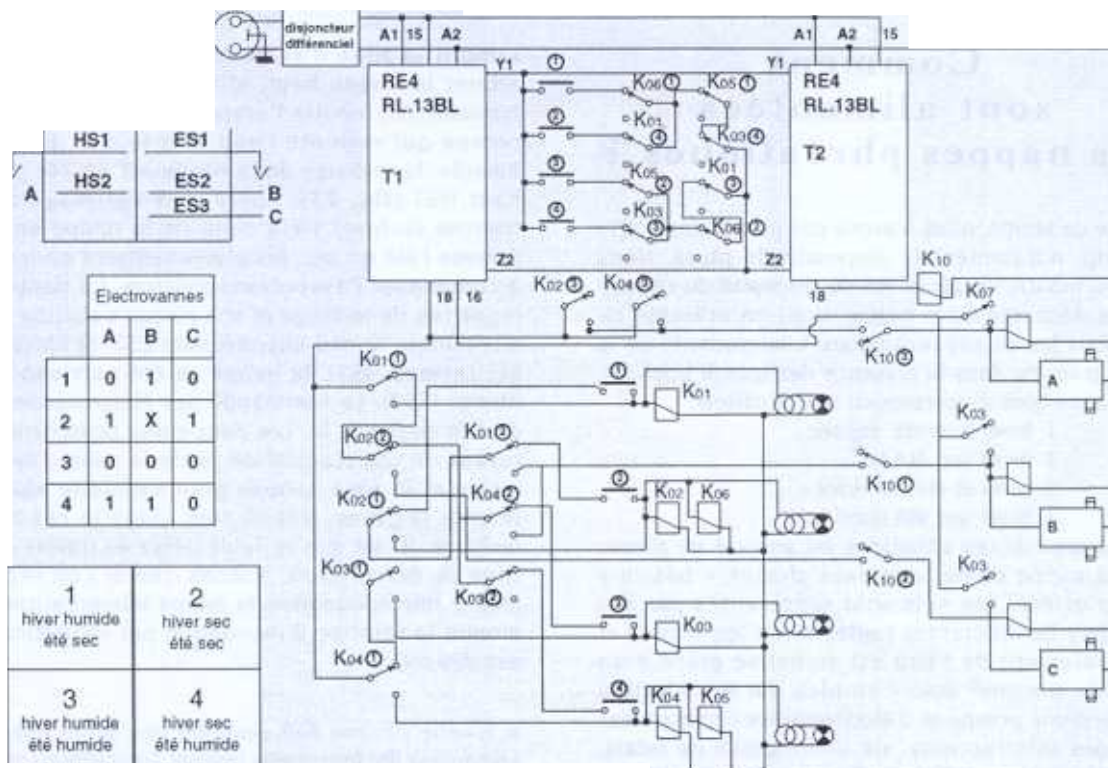


Schéma électrique.