

prétée à l'aide de logiciels spécifiques pour déterminer la configuration verticale des terrains, à savoir le nombre de couches différentes, et l'épaisseur et la résistivité vraie de chacune d'elles.

En se référant aux échelles de résistivité des principales roches et au contexte lithologique général, on pourra donc identifier la nature des différentes couches mises en évidence, de même que la présence ou non d'eau au sein de celles-ci (tableau 1).

En effectuant plusieurs sondages électriques, on pourra établir des coupes de terrain comme sur la figure 30.

On effectuera toujours, si possible, un sondage électrique à l'aplomb d'un forage dont la

constante, suivant un profil rectiligne et en effectuant des mesures en des stations régulièrement espacées. L'interprétation est faite ensuite par corrélation avec les résultats des sondages électriques existants. Cette interprétation est cependant moins précise du fait des phénomènes d'équivalence entre la variation d'épaisseur et la variation de résistivité.

Les méthodes **électromagnétiques** et **magnéto-telluriques** sont des méthodes quelque peu voisines de la méthode électrique. La méthode électromagnétique est en général plus limitée en profondeur d'investigation. Elle est surtout valable pour des substrats conducteurs (argiles ou marnes). La méthode magnéto-tellurique donne des résultats assez équivalents à ceux de la méthode électrique, avec toutefois une meilleure précision sur l'épaisseur des couches résistantes épaisses.

● **Autres types de prospection géophysique**

La prospection sismique, et surtout les prospections gravimétrique et magnétique sont en général beaucoup moins utilisées en hydrogéologie et en particulier pour les formations alluviales. Dans ce type de formations, elles sont en effet souvent limitées à la seule détermination de la profondeur du substratum qui peut "marquer" respectivement par un

contraste de vitesse de propagation des ondes, un contraste de densité ou encore de susceptibilité magnétique.

Piézométrie

Un **piézomètre** est un puits ou un forage qui permet la mesure du niveau de l'eau souterraine en équilibre avec la pression atmos-

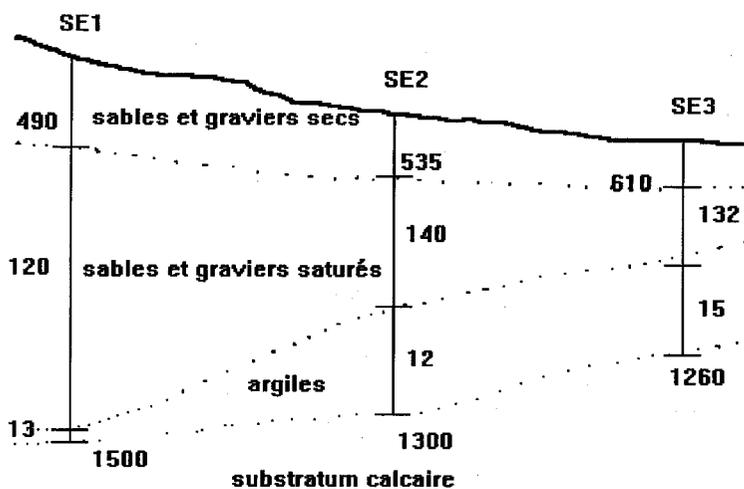


Fig. 30 : Exemple de coupe établie à partir de 3 sondages électriques

coupe lithologique est connue. Celle-ci servira de **calage** pour l'interprétation du sondage et ce calage sera un guide pour l'interprétation des autres sondages.

Pour éviter une multiplication des sondages électriques, on peut également utiliser la méthode du **traîné électrique**. Celle-ci consiste à déplacer un dispositif quadripôle de longueur

La nappe alluviale : aspects quantitatifs et qualitatifs

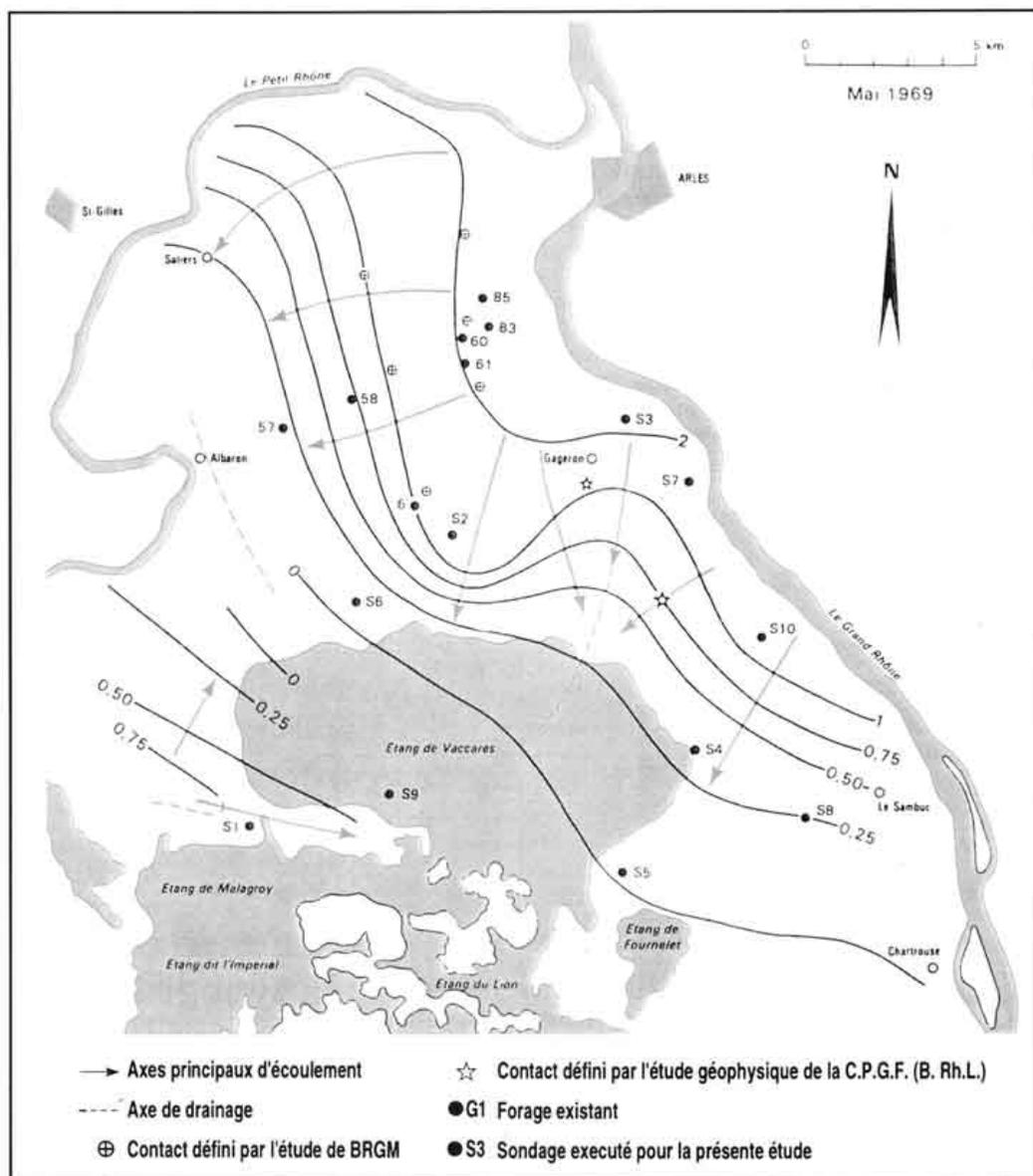


Fig. 31 : Représentation schématique de la surface piézométrique de la nappe du cailloutis
 - Plaine de Camargue -

phérique. Ce niveau, appelé **niveau piézométrique**, se réfère aux points en face duquel l'ouvrage est crépiné.

Si la variation de pression hydrostatique avec la profondeur est normale (linéaire) dans toute la nappe, le piézomètre pourra être crépiné sur toute sa hauteur. C'est le cas d'un aquifère **monocouche**.

Si l'aquifère est constitué de deux ou **plusieurs couches**, celles-ci ont en général des niveaux piézométriques différents. Il faudra alors plusieurs piézomètres, chacun d'eux étant crépiné au niveau d'une seule couche,

pour avoir une représentation complète de la piézométrie en ce point: Ces différents piézomètres, appelés alors plutôt tubes piézométriques, peuvent être contenus dans un seul ouvrage qu'on appelle **piézomètre multiple**.

Les mesures de niveau peuvent être effectuées manuellement, à l'aide d'une sonde (type flotteur ou à contact électrique) et cela donc de manière périodique. Le piézomètre peut également être équipé d'un dispositif de mesure en continu, soit un limnigraphe (flotteur ou niveau bulle à bulle), soit un capteur de pression avec enregistrement numérique.

L'exploitation des mesures piézométriques se traduit principalement par la confection de **cartes piézométriques** et de courbes de **variations piézométriques**.

La carte piézométrique représente la surface piézométrique de la nappe par le tracé de courbes isovalues du niveau de l'eau souterraine. Ces courbes, appelées **lignes équipotentielles**, sont obtenues par interpolation des mesures effectuées aux différents piézomètres. Pour obtenir une représentation suffisamment précise, un nombre minimal de piézomètres est donc nécessaire. Pour une raison de coût, on ne peut pas, non plus, trop multiplier les piézomètres.

La carte piézométrique renseigne sur la direction et sur le sens d'écoulement de la nappe. **Les lignes de courant** sont en effet orthogonales aux lignes équipotentielles (figure 31).

L'enregistrement des **variations du niveau piézométrique** permet de suivre l'évolution de la nappe, par l'observation puis l'analyse des périodes de recharge et des périodes de vidange (figure 32).

Le suivi des niveaux piézométriques est un outil important pour la gestion et la protection des nappes. Pour les nappes alluviales en relation avec un cours d'eau, ce suivi s'accompagnera de l'enregistrement et du suivi parallèle des **niveaux du cours d'eau**.

La comparaison de l'évolution des niveaux dans le cours d'eau et dans la nappe permettra de préciser la connexion hydraulique entre ces deux composants du système, et en particulier le degré de colmatage éventuel des berges et du fond du cours d'eau.

Le choix de l'implantation des piézomètres est très important. Ils devront être situés dans les zones les plus **représentatives** et les plus **significatives**. Cela implique évidemment un état minimal de connaissance de la géométrie de la nappe et de son régime d'alimentation.

De manière générale, il sera intéressant de disposer de piézomètres au voisinage du cours d'eau, au voisinage des versants (coteaux), de même qu'au moins un piézomètre central dont les variations de niveau seront corrélées à l'enregistrement des pluies.

L'établissement de la piézométrie ne suffit cependant pas pour la détermination des débits de la nappe et notamment des flux d'échange avec le cours d'eau. **L'estimation des débits** souterrains nécessite, en outre, l'acquisition des **caractéristiques hydrodynamiques** de la formation aquifère : la perméabilité et le coefficient d'emménagement. Celles-ci peuvent être obtenues par la réalisation de **pompages d'essai**.

Pompages d'essai

Les pompages d'essai sont effectués dans des puits ou dans des forages. Le pompage est de durée limitée et la méthode consiste à enregistrer la variation de niveau dans le puits et/ou dans un piézomètre voisin pendant le pompage (rabattement), et un certain temps après l'arrêt du pompage (remontée). Les débits de pompage sont également mesurés.

Un programme classique de pompage d'essai se compose en général d'un pompage par paliers de débits et d'un pompage de longue durée à débit constant.

● **Le pompage par paliers** (figure 33)

sert à déterminer les pertes de charge créées par l'équipement du puits au niveau des crépines, de même que l'évolution du débit spécifique (débit par mètre de rabattement) et le **débit critique**. Le débit critique est le débit au-delà duquel le rabattement commence à croître exponentiellement avec le débit. La connaissance du débit critique permet donc de fixer un débit d'exploitation rentable.

Les paliers, au nombre de 3 ou 4, sont de durée égale, en général de 4 à 8 heures cha-

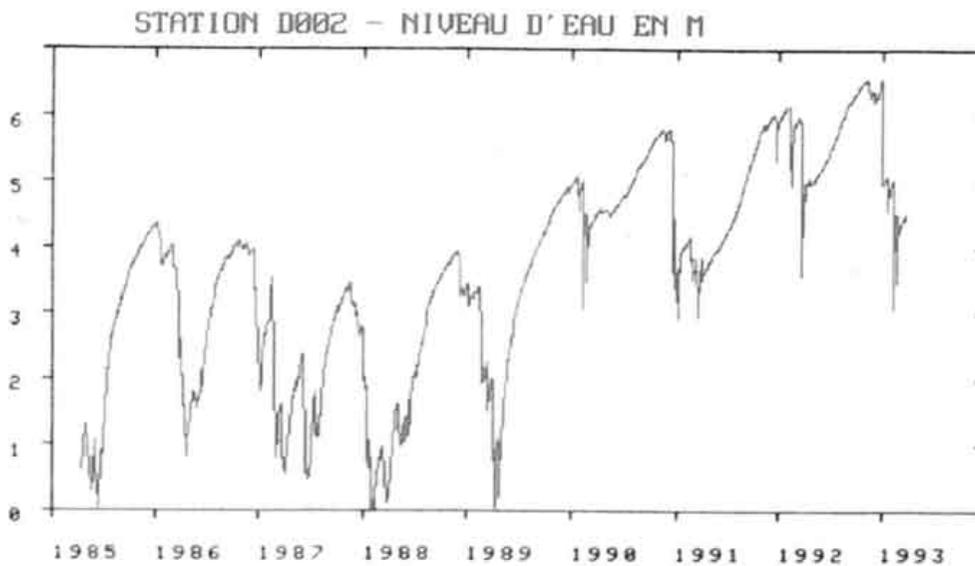
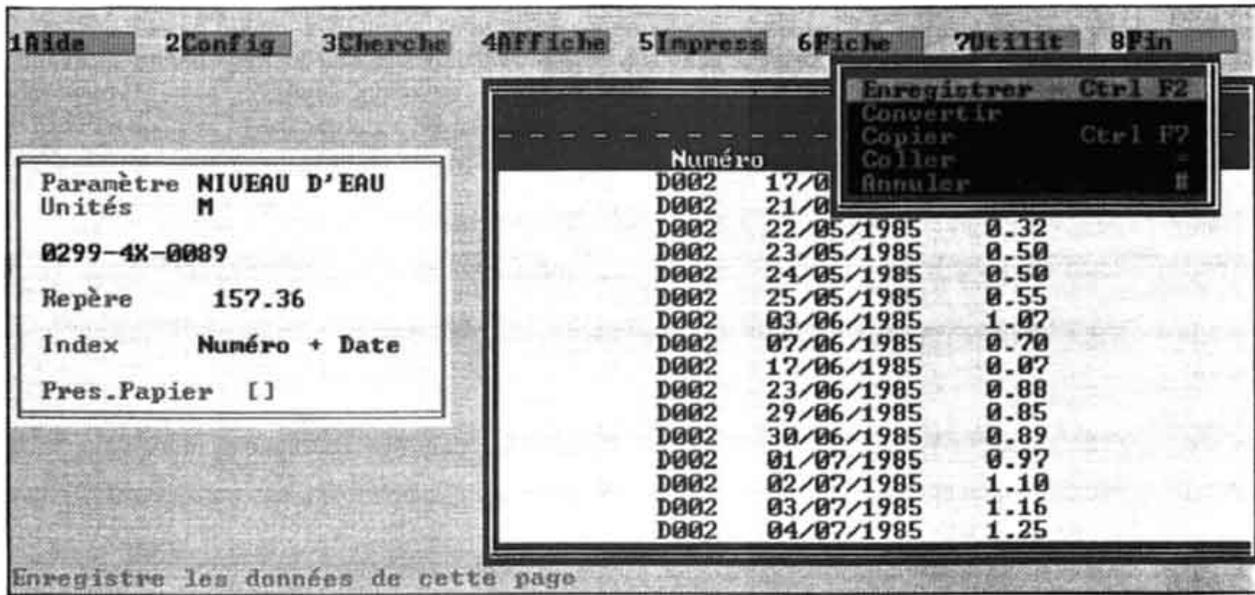


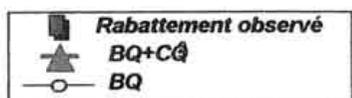
Fig. 32 : Enregistrement des variations piézométriques

cune. Pendant un palier, le débit est constant et les débits sont croissants d'un palier à l'autre. Pour un essai à 4 paliers, les débits seront fixés à environ 25, 50, 75 et 100 %

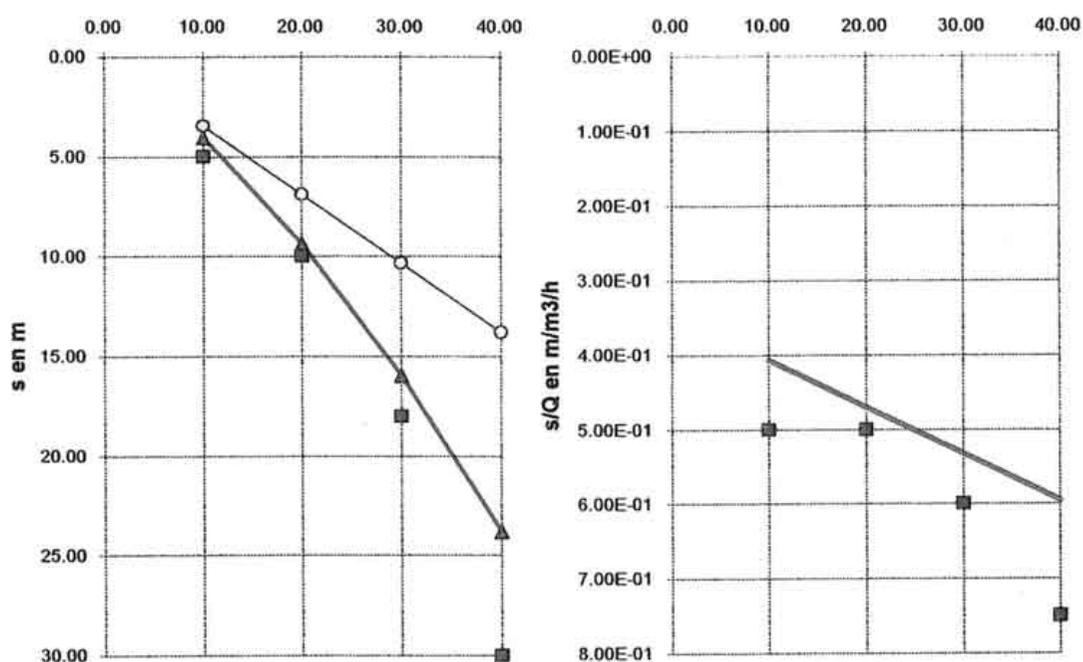
du débit maximal. Entre chaque palier, le pompage sera arrêté jusqu'à ce que le niveau d'eau soit pratiquement revenu à sa valeur initiale (niveau naturel), (figure 33).

ESTIMATION DES PERTES DE CHARGES

$$\frac{s}{Q} = B + CQ$$



Date du pompage d'essai: 23/01/1995


 Débit en m³/h

| C s ² /m ⁵ | B s/m ² |
|----------------------------------|--------------------|
| 81518 | 1242 |

 Débit en m³/h

| | Palier 1 | Palier 2 | Palier 3 | Palier 4 |
|---|----------|----------|----------|----------|
| Q (m³/h) | 10.00 | 20.00 | 30.00 | 40.00 |
| s/Q observé en m/m³/h | 5.00E-01 | 5.00E-01 | 6.00E-01 | 7.50E-01 |
| s/Q calculé en m/m³/h | 4.08E-01 | 4.71E-01 | 5.34E-01 | 5.97E-01 |
| Ecart (s/Q cal - s/Q obs) | -9E-02 | -3E-02 | -7E-02 | -2E-01 |
| Temps de pompage (s) | 14400 | 14400 | 14400 | 14400 |
| Temps de remontée (s) | 14400 | 14400 | 14400 | 14400 |
| P.D.C. Quadratique CQ (m) | 0.63 | 2.52 | 5.66 | 10.06 |
| P.D.C. Linéaire BQ (m) | 3.45 | 6.90 | 10.35 | 13.80 |
| Rabattement calculé (m) | 4.08 | 9.42 | 16.01 | 23.86 |
| Rabattement observé (m) | 5.00 | 10.00 | 18.00 | 30.00 |
| Ecart (Rcal-Robs) en m | -0.92 | -0.58 | -1.99 | -6.14 |

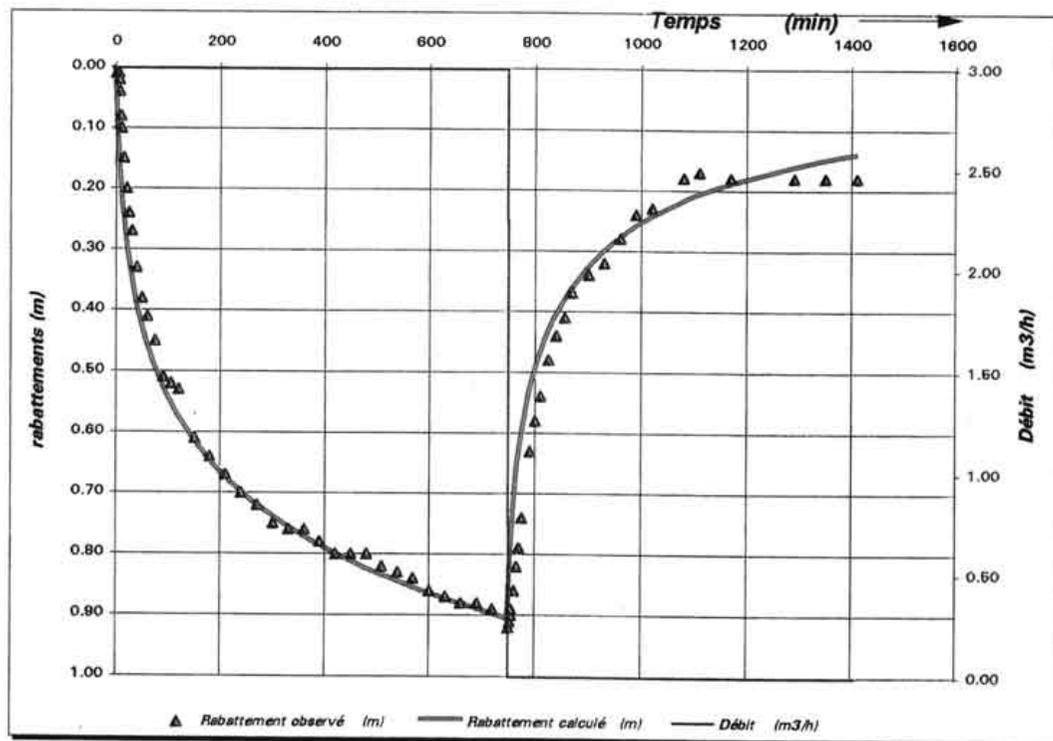
Fig. 33 : Pompage d'essai par palier



LOGICIEL ISAPE version 6.0

POMPAGE D'ESSAI

Référence client:
 Opérateur :
 Date du pompage: 26-avr-95
 Interprétation :
 Nom du forage: s17
 Aquifère testé: Socle
 Diamètre du forage: 251 mm
 Fichier traité: A:\MAS17.ISA
 Nature du forage: PIEZO
 Niveau hydros. initial: 5.7 m



RÉSULTATS DE L'AJUSTEMENT

Méthode d'interprétation: THEIS

Aquifère captif, homogène, isotrope d'extension infinie, puits parfait

| Transmissivité (m ² /s) | Coefficient d'emmagasinement | Rayon d'observation (m) | Perte de charge quadratique (e ² /m ⁵) | Coef. perte de charge linéaire (ekin) | Effet de capacité | Effet de vidange |
|------------------------------------|------------------------------|-------------------------|---|---------------------------------------|-------------------|------------------|
| 3.60E-04 | 3.00E-03 | 9.5 | 0 | 0 | Non | Non |

Nombre de limite
0

La nappe alluviale : aspects quantitatifs et qualitatifs

Fig. 34 : Pompage d'essai à débit constant

● **Le pompage de longue durée** est effectué à débit constant. Sa durée est en général comprise entre 24 et 72 heures. L'essai pourra cependant être arrêté avant la

fin de la durée prévue si le rabattement se stabilise.

Les mesures de niveau sont effectuées à des intervalles de temps très rapprochés au

début, puis de plus en plus espacés ensuite lorsque les variations de niveau deviennent plus faibles. Le débit de pompage est également mesuré régulièrement. On s'efforce de le garder constant, mais si pour quelque raison cela n'était pas possible, l'essai pourra quand même être interprété.

Après l'arrêt du pompage, on observe également la remontée du niveau en fonction du temps, et cela jusqu'à un retour au niveau initial avant pompage.

L'interprétation est effectuée à l'aide de logiciels spécialisés. Le principe de l'interprétation est d'ajuster à la courbe niveau/temps enregistrée (descente et remontée), une courbe

théorique calculée en faisant varier les valeurs des caractéristiques hydrodynamiques et pour différentes hypothèses de conditions limites.

L'essai de longue durée (figure 34) permet donc la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère : la **transmissivité** et le **coefficient d'emmagasinement**.

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère en plusieurs points sera en particulier nécessaire pour la construction d'un modèle numérique de simulation des écoulements de la nappe.

Évolution du fonctionnement

Influence des aménagements sur le régime des eaux

Le régime naturel de l'eau souterraine des nappes alluviales (alimentation, écoulement, exutoires) peut être modifié par des aménagements pratiqués soit **sur le cours d'eau** associé, soit sur la surface ou la subsurface de la **vallée alluviale** elle-même.

● **Les aménagements du cours d'eau**

Les principaux aménagements possibles du cours d'eau sont la construction de barrages, les endiguements, et l'exploitation de gravières.

● **Les barrages**

Par l'élévation du niveau des eaux de surface, le barrage favorise la recharge de la nappe alluviale associée. En amont du barrage, les niveaux de la nappe vont remonter très sensiblement et entraîner également une remontée des niveaux à l'aval, remontée qui s'estompe avec la distance au barrage.

A l'aval du barrage, un phénomène inverse se produit cependant et se superpose au précédent, à savoir une diminution de la recharge de la nappe par la suppression de l'épandage des crues. En fonction de la distance au barrage c'est l'un de ces deux effets contraires qui peut l'emporter sur l'autre (figure 35).

Par ailleurs, l'impact du barrage sur la nappe va se modifier au cours du temps. En effet toute retenue d'eau créée par un barrage est sujette à un dépôt de sédiments. Le colmatage progressif du fond et des berges de la

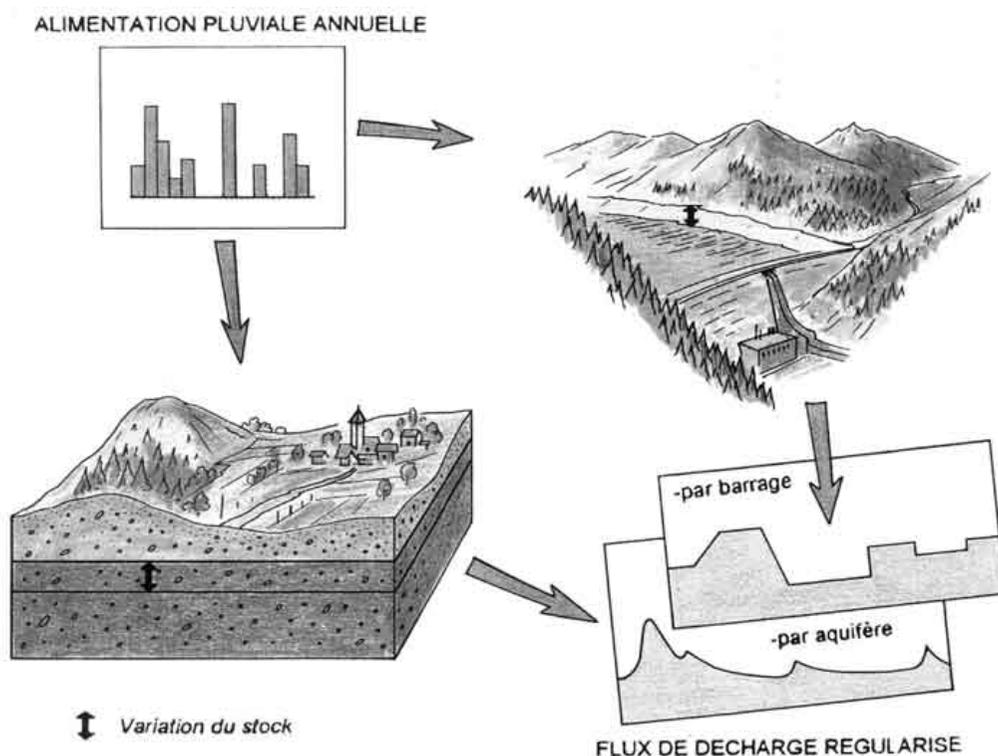


Fig. 35 : Effet d'un barrage

retenue par des particules fines va entraîner une diminution des échanges vers la nappe. L'effet de recharge s'estompera donc avec le temps, le niveau général de la nappe redescendra et pourra même, dans certains cas, décrocher complètement du niveau de la retenue. Ces phénomènes se manifestent généralement sur des périodes de l'ordre de la dizaine ou de quelques dizaines d'années.

● Les endiguements

La canalisation d'un cours d'eau entraîne une diminution des échanges nappe-rivière.

En période de basses eaux, les berges, rendues totalement ou en partie étanches, peuvent limiter le drainage de la nappe par la rivière. A l'opposé, pendant les périodes de crues elles limitent la réalimentation naturelle de la nappe par la rivière. Elles limitent également l'alimentation induite par des pompages éventuels à proximité de celle-ci.

● Les gravières

Les modifications artificielles du lit de la rivière créées par les extractions de granulats provoquent un abaissement général du niveau de la rivière et consécutivement un abaissement du niveau de la nappe.

Les modifications du rythme érosion-sédimentation dues à la création de gravières peuvent avoir un effet pendant plusieurs dizaines d'années.

● Les aménagements de la vallée alluviale

Les principaux aménagements d'une vallée alluviale qui peuvent avoir un impact sur le régime des eaux souterraines sont : la construction de canaux, la construction de remblais importants, le déboisement ou le reboisement, le changement de types de cultures agricoles, la modification des pratiques agricoles, ou encore les travaux en zone urbaine et industrielle.

● **La construction de canaux**

La construction de canaux non étanches pourra, selon le cas et selon la période, soit faciliter le drainage de la nappe, soit augmenter son alimentation.

● **La construction de remblais importants**

La construction de remblais sur une grande longueur, comme ceux par exemple pratiqués pour le passage d'une autoroute ou d'une voie ferrée, pourra selon son orientation stopper ou détourner le ruissellement de surface. Ceci entraînera une modification de l'infiltration donc de la recharge de la nappe qui sera ainsi mieux alimentée en amont de l'ouvrage, mais par contre moins bien en aval.

● **Le déboisement ou le reboisement**

La forêt intercepte tout d'abord une partie de la pluie. Pour étudier ce phénomène, plusieurs mesures ont été effectuées en France par le CEMAGREF sur les sites des bassins versants du Réal Collobrier, de Vallcèbre, et de Prades. Les résultats (d'après J. Lavabre) indiquent qu'environ 25 % de la pluie sont interceptées par la forêt constituée d'arbousiers, de chênes lièges, de pins sylvestres et de chênes verts.

Par comparaison avec un sol nu, la forêt consomme plus d'eau par transpiration. Elle a par contre tendance à faire baisser l'évaporation directe potentielle donc l'évaporation directe réelle. Qu'en est-il de la résultante évapotranspiration ? Les expériences faites à l'aide de cases lysimétriques ont montré qu'un sol recouvert d'arbustes évapotranspirait plus qu'un sol recouvert de prairies, et qu'un sol recouvert de prairies évapotranspirait plus qu'un sol nu.

Par ailleurs, la forêt diminue le ruissellement (sauf si la pente topographique est nulle)

au bénéfice de l'infiltration. Sous cet aspect, elle est donc bénéfique pour l'alimentation des nappes.

En diminuant l'entraînement des sols, la présence de forêt limite également la sédimentation dans les barrages.

● **Le changement de types de culture agricole**

Les différents types de culture influent l'infiltration de manière assez complexe, et différente suivant que les terrains sont en pente ou non.

La possibilité d'infiltration est d'autant plus forte que la **couverture végétale** est **continue et dense**, et qu'elle est **présente au moment des pluies**. La pénétration des racines de la végétation dans le sol augmente en effet la porosité de celui-ci et favorise donc l'infiltration, et cela en particulier au détriment du ruissellement lorsque le terrain est en pente. A priori donc, les **prairies permanentes**, seraient plus favorables à l'infiltration que les cultures annuelles et parmi celles-ci, les **cultures d'hiver** comme le **blé** ou l'**orge** plus favorables que les **cultures de printemps**, telles que le **maïs** ou les **plantes sarclées** (betterave, pomme de terre) qui ne commencent à couvrir le sol qu'à partir du mois de mai.

Par contre, l'**évapotranspiration réelle** est plus forte en hiver pour les sols à prairies que pour les sols à cultures de printemps alors absentes. Lorsque les terrains sont **plats**, le ruissellement est nul, l'infiltration est égale à la pluie efficace, et il semblerait qu'au total sur l'année elle soit alors **au contraire** plus forte pour les sols à cultures de printemps que pour les prairies qui évapotranspirent plus en hiver et diminuent comparativement les pluies efficaces. C'est ce qu'ont montré du moins les études concernant la recharge de la nappe phréatique d'Alsace, qui ont été réalisées à l'aide d'un modèle de bilan hydrique (L. Zilliox *et al.*).

● **la modification des pratiques agricoles**

Le **sarclage** (arrachage des mauvaises herbes et élimination des croûtes superficielles) augmente l'infiltration.

Le **billonnage** augmente le ruissellement lorsqu'il est pratiqué dans le sens de la plus grande pente, et le diminue lorsqu'il est pratiqué dans le sens des lignes de niveau. L'infiltration varie donc dans le sens contraire.

Les sols sont d'autant plus stables, faciles à travailler et plus perméables que la **teneur en humus** est élevée. Les **labours** d'automne et d'hiver sont des opérations favorables à l'infiltration car ils enfouissent les résidus de récolte, les mauvaises herbes et ameublissent le sol au moment des pluies.

Le **brûlage des pailles** après les moissons, qui a pour but de détruire les parasites et les mauvaises herbes, et d'enrichir le sol en minéraux, appauvrit par contre le sol en humus et diminue ainsi sa perméabilité. Il a donc un effet néfaste sur l'infiltration.

Les **labours profonds** ameublissent le sol sur une plus grande épaisseur et permettent de briser ce qu'on appelle la "semelle de labour" provenant du surcompactage de la zone située en dessous de la zone labourée, qui est dû à la pression des pneus des engins de labour, conjuguée parfois avec des interventions réalisées dans des conditions hydriques défavorables.

Il est à noter que, dans le passé, les agriculteurs labouraient en suivant les lignes de niveau, alors que maintenant grâce à la puissance et à la sécurité des tracteurs modernes ils labourent probablement plus fréquemment suivant la plus grande pente, ce qui favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration.

Les **remembrements** ont pour but de réorganiser les propriétés agricoles en unités de plus grandes dimensions. Ils facilitent l'exploitation et augmentent la productivité. Ils sont en général accompagnés, pour l'amélioration de la desserte, de travaux connexes tels que :

- aménagement de la topographie,
- arasement des talus,
- suppression des haies,
- création de nouveaux réseaux de chemins pour le passage de gros engins,
- travaux hydrauliques tels que drainage ou aménagements de cours d'eau.

La géométrie des parcelles joue un rôle essentiel dans les conditions d'infiltration. Ainsi l'orientation de la longueur de la parcelle selon la ligne de plus grande pente doit être évitée, car le labour, pratiqué le plus souvent suivant cette plus grande dimension, favorise le ruissellement.

L'arasement des talus et la suppression des haies ont également pour effet de favoriser le ruissellement au détriment de l'infiltration, du moins lorsque les terrains sont en pente.

Afin de compenser ces effets, le décret n° 95 - 8 du 27 janvier 1995 portant application de la loi sur l'eau de 1992 et de la loi paysages du 8 janvier 1993, prévoit les dispositions suivantes devant accompagner tout projet de remembrement :

- une étude d'aménagement obligatoire porte notamment sur la qualité, le régime, le niveau et le mode d'écoulement des eaux, et débouche sur une étude d'impact,
- si des travaux tels que l'arrachage des haies, l'arasement des talus, le comblement des fossés, l'écoulement des eaux nuisibles, la rectification, la régularisation et le curage des cours d'eau non domaniaux...sont envisagés, des dispositions permettant de maintenir une gestion équilibrée de l'eau doivent les accompagner.

Par ailleurs, dans les zones à forte pente, le dessin des parcelles par le géomètre intègre la nécessité de ne pas orienter leur longueur selon la plus grande pente.

En conclusion, les travaux connexes du remembrement ne devraient plus être de nature à favoriser le ruissellement. Si tel était néanmoins le cas, des mesures compensatoires corrigeront cet effet.

● **Les travaux en zone urbaine et industrielle**

De nombreuses zones urbaines et industrielles sont situées dans des vallées alluviales.

Ces zones se caractérisent par leur surface totalement ou partiellement imperméabilisée, par l'effet des réseaux d'AEP et d'assainissement, par des travaux dans le proche sous-sol tels que tranchées SNCF, métro, fondations d'immeubles, parkings souterrains, etc.

Les effets sur les nappes d'eau souterraine sont de manière générale assez complexes, et peuvent soit se superposer, soit s'opposer. Ces effets sont en particulier :

- la déviation de l'infiltration,
- le drainage des tranchées,
- le cloisonnement de la nappe par les barrières étanches que constituent les fondations, les parkings souterrains, etc.
- la réalimentation de la nappe par les fuites de réseaux,
- les modifications des prélèvements.

La **dévi**ation de l'infiltration est provoquée par la construction de chaussées, routes, ou autres surfaces imperméabilisées telles que grands immeubles, parkings en surface, grandes places, plates-formes de stockage et de déchargement, etc.

Ces surfaces favorisent le ruissellement, au détriment de l'infiltration. Avec un réseau d'évacuation des eaux pluviales approprié, le ruissellement pourra cependant être dirigé vers des zones à forte perméabilité (évidemment sous réserve de leur existence) où se produira une infiltration et une recharge de la nappe. Le résultat final sera néanmoins une délocalisation des zones de recharge, avec donc possibilité de création de creux et de dômes piézométriques, dont les conséquences devront être étudiées en fonction du contexte local et en relation avec la gestion de la nappe.

Pour ce qui concerne le ruissellement sur les chaussées, il est à noter qu'un certain type appelé chaussée à structure réservoir a été en particulier étudié par les Laboratoires Centraux des Ponts et Chaussées. La réduction très importante du ruissellement apportée par cette technique, par rapport aux chaussées classiques, a été mise en évidence, parallèlement à un rôle de filtre et de piégeage de pollution.

Le **drainage effectué par des tranchées**, soit permanentes telles les tranchées SNCF, soit provisoires telles que celles nécessaires par exemple aux travaux de construction d'un métro, peut provoquer une baisse notable des niveaux piézométriques de la nappe et cela sur une zone relativement étendue. Ce phénomène a été en particulier décrit lors des travaux du métro de Lyon.

Dans certains de ces cas également, une collecte adéquate des eaux drainées pourra les diriger vers des zones propices à l'infiltration, et à la recharge de la nappe dans ces secteurs.

Le **cloisonnement de la nappe** est dû à l'existence de nombreux écrans imperméables que constituent par exemple les fondations d'immeubles, les murs de parkings souterrains, les rideaux de palplanches, les parois moulées injectées, etc.

Ce cloisonnement crée des discontinuités piézométriques et perturbe la dynamique des nappes en empêchant ou limitant les réalimentations latérales. En particulier, dans les nappes littorales, cela peut entraîner une progression de l'intrusion du biseau salé marin dans certaines zones.

Les **fuites des réseaux** AEP ou des réseaux d'assainissement alimentent directement les nappes. Dans certaines villes, les fuites du réseau AEP atteignaient 30 à 50 % du débit exploité. Ces valeurs sont actuelle-

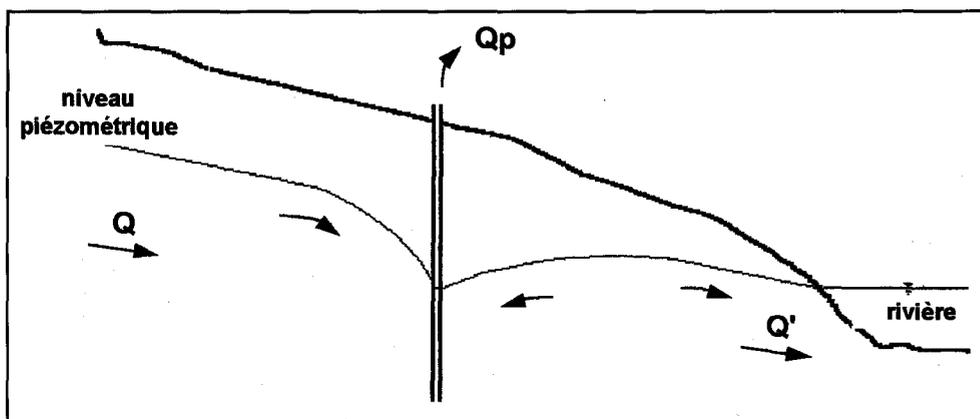


Fig. 36 : Le pompage ne soutire pas l'eau de la rivière

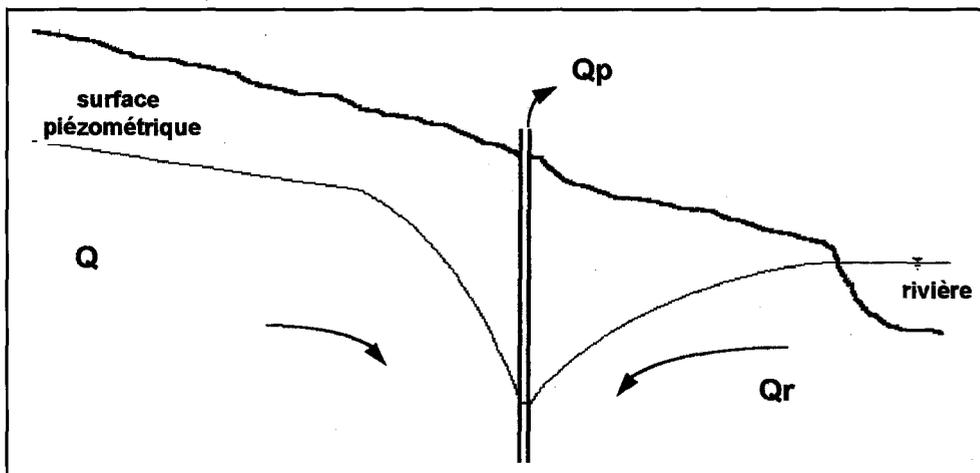


Fig. 37 : Le pompage soutire l'eau à la rivière

ment en régression. Cette recharge, associée aux phénomènes de cloisonnement, peut créer dans certains secteurs des remontées de nappe indésirables, ou encore créer de petites nappes perchées.

Enfin, **les modifications des prélèvements** dues à des créations ou, au contraire, des cessations d'activité sont assez fréquentes en milieu urbain et industriel. La surface piézométrique de la nappe sera parfois fortement affectée, et il faudra en tenir compte dans la gestion de la nappe.

Influence de l'exploitation

● Effet d'un pompage dans une nappe alluviale

A partir de sa mise en marche, le pompage va créer un cône de rabattement qui va s'approfondir et s'étendre (régime transitoire) pour

se stabiliser au bout d'un certain temps (régime permanent).

● Nappe drainée par la rivière

En fonction des valeurs du débit naturel de la nappe, du débit de pompage, de la distance du puits à la rivière, et des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe, le régime d'écoulement permanent pourra s'établir selon l'une des deux figures 36 ou 37.

Dans le premier cas, le cône de rabattement n'est pas assez important pour inverser le sens d'écoulement de la nappe jusqu'à la rivière. Aucun débit n'est soustrait à la rivière. Le débit pompé est néanmoins dans sa totalité un manque à gagner pour la rivière.

Dans le second cas, le cône de rabattement inverse complètement le sens d'écoulement de la nappe entre le puits et la rivière. Un débit est réellement soustrait à la rivière. Cette

La nappe alluviale : aspects quantitatifs et qualitatifs

situation peut même être réalisée au cours du régime transitoire. Dans ce cas le débit sous-trait à la rivière augmente avec le temps et se stabilisera lorsque le régime permanent sera établi.

● **Nappe alimentée par la rivière**

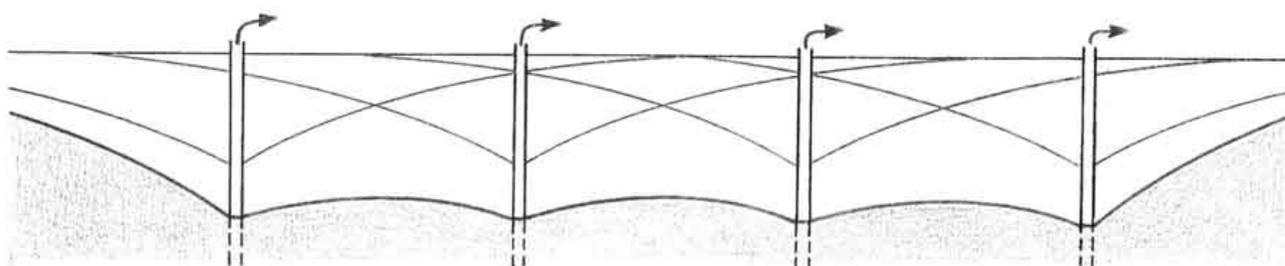
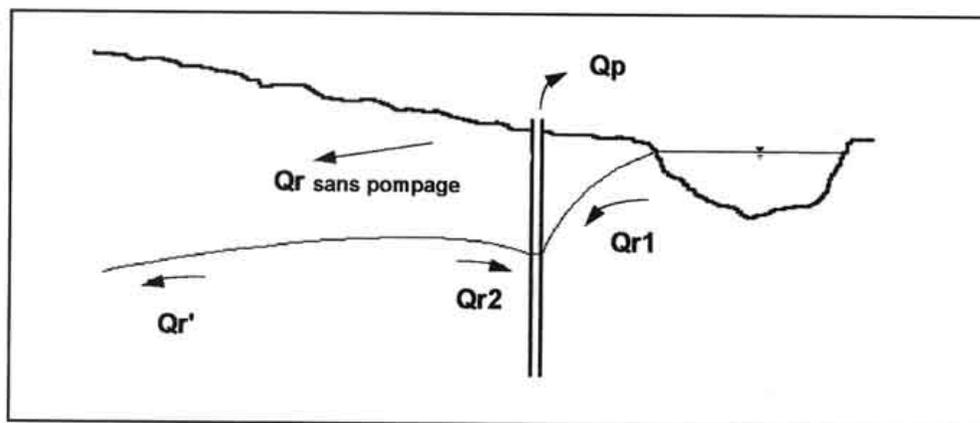
Lorsque la rivière alimente la nappe, et si le cône de rabattement atteint la rivière, le pompage augmentera progressivement le débit en provenance de la rivière jusqu'à l'établissement d'un régime permanent (figure 38).

● **Influence des limites**

L'influence des limites de la nappe, telles que limites imperméables ou limites de réalimentation (rivières ou plans d'eau), se calcule en appliquant la théorie des images et le principe de superposition des écoulements.

L'effet d'une **limite imperméable** sur un pompage est analogue à l'effet d'un puits virtuel symétrique du puits de pompage par rapport à cette limite (puits image) et commençant au même moment à **pomper le**

Fig. 38 : Le pompage augmente le débit provenant de la rivière



et de vastes zones déprimées peuvent se développer

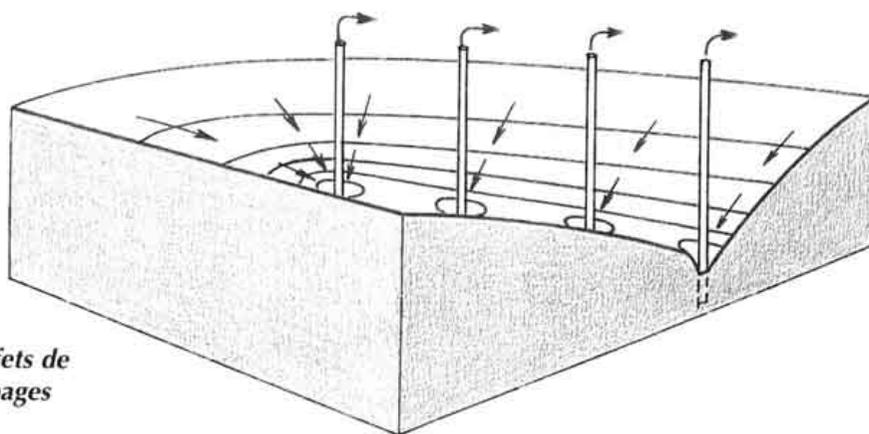


Fig. 39 : Les effets de plusieurs pompes s'ajoutent

La nappe alluviale : aspects quantitatifs et qualitatifs

même débit, cela dans la nappe supposée alors d'extension infinie.

L'effet d'une **limite de réalimentation**, telle qu'une rivière, se calcule par le même principe, le puits virtuel image étant alors un **puits d'injection**.

Le rabattement de la nappe en tout point et tout temps donnés est la somme des rabattements provoqués par le puits principal et toutes ses images éventuelles.

● **Effet de plusieurs pompages**

En application du principe de superposition des écoulements, l'effet de plusieurs pompages est la somme des effets de chaque pompage.

Si on considère n pompages, chacun ayant débuté à un temps t_i , avec un débit Q_i , le

rabattement créé au bout d'un temps t par l'ensemble des forages, en un point d'observation situé à une distance r_i de chaque pompage sera donné par l'équation symbolique suivante :

$$\Delta h_n = \sum_1^n \Delta h_i = \sum_1^n f(Q_i, r_i, t-t_i) \quad (\text{figure 39}).$$

● **Ligne de puits**

Un exemple intéressant de dispositif de captage en nappe alluviale est la batterie de puits en ligne de Metz-Nord qui alimente en eau potable l'agglomération messine. La ligne de puits est à peu près parallèle à la Moselle. Les 120 puits existants sont siphonnés par des conduites souterraines et rabattent donc la nappe alluviale au même niveau.

Qualité de la ressource en eau

Qualité naturelle

La qualité naturelle de l'eau des nappes alluviales est conditionnée par la composition de l'ensemble des eaux qui contribuent à son alimentation.

Celles-ci interagissent tout au long de leur parcours avec les terrains qu'elles traversent, tant au cours de leur infiltration à travers le sol, que dans leur cheminement au sein de diverses formations, fracturées, karstifiées ou poreuses, ou encore au cours de remontées depuis des zones très profondes.

Dans un environnement de massifs anciens où dominant les roches cristallines, les eaux sont naturellement faiblement minéralisées. A l'opposé, dans les bassins

sédimentaires, les dépôts carbonatés encaissants confèrent à l'eau qui les traverse une dureté et une minéralisation importantes.

Les échanges entre l'eau et les minéraux des terrains traversés dépendent également du temps de contact, c'est-à-dire de la vitesse d'écoulement.

Certains éléments présents naturellement dans l'eau peuvent atteindre des concentrations telles qu'elles les rendent impropres à la consommation. Ainsi, les chlorures peuvent être présents en excès dans les zones littorales. Le fer et le manganèse en grande quantité dans l'eau posent des problèmes pour l'exploitation dans des environnements divers (Alsace, Moselle, Rhône, etc.).

Pollution des nappes alluviales

● Origine

La détérioration de la qualité originelle des eaux de nappe alluviale est liée à des formes de pollution multiples, liées au déploiement des activités humaines dans les vallées fluviales et les plaines qui leur sont associées. Leurs conséquences varient en fonction de la

lisées, stockage des ordures ménagères, cimetières, etc.

- **les industries** : le transport et le stockage de produits chimiques, rejets dans l'eau et dans l'atmosphère, déchets toxiques, etc.
- **l'agriculture** : épandage d'engrais et de pesticides, élevages intensifs, modification des pratiques culturales (réduction des surfaces toujours en herbe au profit de terres labourables, suppression des zones humides...).

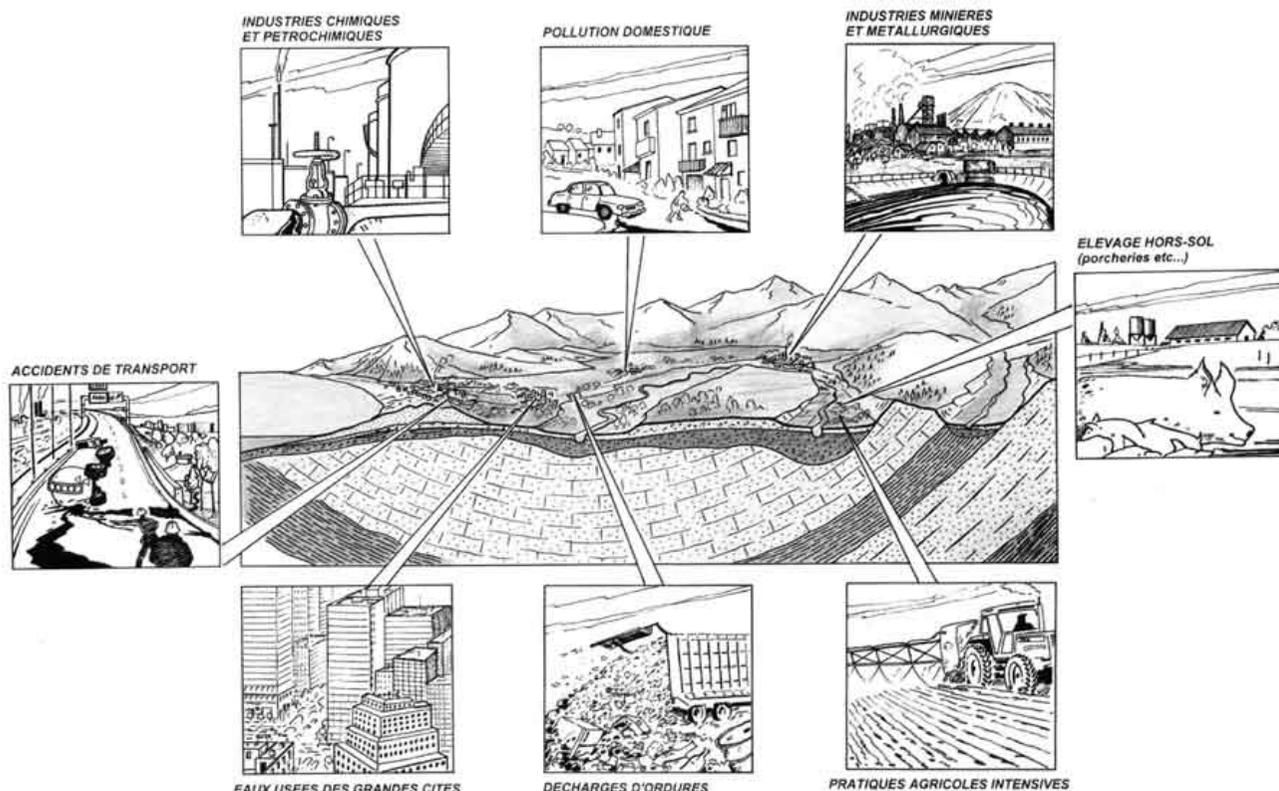


Fig. 40 : Les activités polluantes

nature et du fonctionnement du milieu dans lequel elles évoluent, de l'importance et de l'extension de la source de pollution et de la durée pendant laquelle cette source fonctionne.

Les activités polluantes (figure 40) Les pollutions peuvent être engendrées accidentellement ou de façon durable par :

- **l'urbanisation** : rejet d'eaux usées, ruissellement sur les surfaces imperméabi-

Les différentes formes de pollution qui en résultent peuvent être de nature chimique (pesticides, solvants, hydrocarbures, détergents), ou microbiologique (virus, bactéries, micro-organismes).

Quelques exemples de pollution sont décrits au tableau 2 : "grands types de pollutions"

Les différents types de substances polluantes sont récapitulés au tableau 3 : "princi-

| | Locale | Linéaire | Diffuse |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|
| Accidentelle | Transport, manutention | Rive de cours d'eau | Aérosol de type "Tchernobyl" |
| Diffuse (durable ou répétée) | Fuites, décharges, injection | Littoral, cours d'eau, égouts | Friches industrielles, engrais, pluies acides |

Tableau 2 : Eaux souterraines - Grands types de pollution

| | Catégorie | Substances | Ordre de grandeur de la C.M.A. |
|------------------|---|---|---|
| Minérales | Éléments majeurs | Cl, SO ₄ , NO ₃ Na ... | 10 - 100 mg/l |
| | "Oligo-éléments" | Fe, Mn, Al, B, F, NH ₄ ... | 0.1 - 1 mg/l |
| | Éléments traces, métaux lourds | Cd, Pb, Zn, Hg ... | 1 - 10 µg/l |
| Organiques | Hydrocarbures | Fioul kérozène huile, "brut" | 10 µg/l |
| | Molécules "simples" | Organo-halogénés (trichloréthylène) | 0.2 µg/l |
| | Molécules complexes | Phytoprotecteurs, pesticides, désherbants (atrazine) | 0.5 - 0.1 µg/l |
| Biochimiques | Produits et déchets alimentaires | Matières fermentescibles | Normes pour matière en suspension, oxygène dissous, DCO, DBO5 |
| Microbiologiques | Virus, bactéries pathogènes, micro-organismes | | Germes tests de contamination |
| Radionucléides | | | |

Tableau 3 : Principales substances polluantes des eaux souterraines

C.M.A. = Concentration Maximale Admise

pales substances polluantes des eaux souterraines".

Il s'agit :

- de substances chimiques minérales, présentes normalement dans l'eau mais considérées comme polluantes en cas d'excès. Ce sont, par exemple, les sels tels que les nitrates (figure 41), les chlo-

rures, la potasse ou les métaux lourds (cadmium, plomb, mercure...),

- de substances organiques comme les pesticides, les herbicides, ou les solvants tels que le trichloréthylène,
- de substances biochimiques comme les déchets alimentaires,
- de substances bactériologiques : les virus sont les plus couramment entraînés,

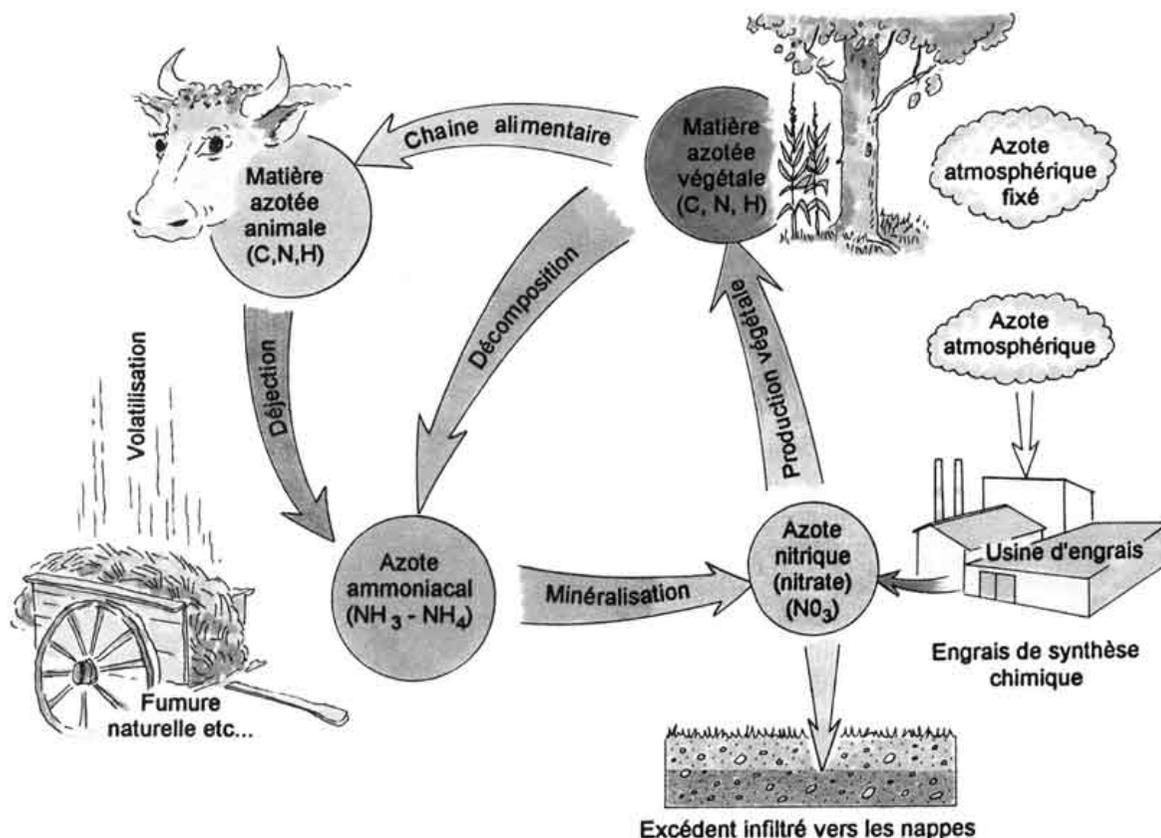


Fig. 41 : Pollution par les nitrates

au contraire des bactéries qui circulent relativement peu dans les sols,
 - des radionucléides (éléments radioactifs).

Les zones d'apport

Les zones par lesquelles un polluant peut s'introduire au sein du réservoir alluvial peuvent être définies en recherchant les différentes composantes de son alimentation.

Celles-ci se répartissent entre la vallée fluviale, la plaine adjacente et les coteaux.

L'infiltration à partir du fleuve est conditionnée par :

- la position relative du niveau de la nappe et celle de la surface d'eau libre du fleuve,
- les paramètres hydrodynamiques du réservoir alluvial,
- le colmatage des berges et leurs propriétés filtrantes, qui peuvent dans cer-

taines conditions retenir, fixer ou transformer les produits transportés par l'eau,
 - l'exploitation de la nappe, qui peut provoquer une alimentation induite par abaissement du niveau de la nappe au voisinage du fleuve.

Au niveau de la plaine, les pollutions peuvent pénétrer à partir de la surface du sol, après un délai de transit plus ou moins long à travers la zone non saturée. La rapidité du transfert entre la surface du sol et le toit de la nappe dépend :

- de l'épaisseur de la zone non saturée,
- de son pouvoir de rétention, qui est beaucoup plus élevé dans le cas d'une couverture argileuse que dans le cas d'une couverture sableuse,
- de la couverture végétale,
- de la pente du sol.

Le réservoir alluvial peut être en communication avec une nappe voisine, sous-jacente ou adjacente (coteaux). Les relations existant entre les deux formations aquifères seront plus ou moins directes en fonction des propriétés hydrodynamiques de chacune d'entre elles. L'alimentation par une nappe sous-jacente peut se faire par l'intermédiaire d'une couche semi perméable. La vitesse de transfert à travers cette couche est relativement lente, mais la surface concernée peut être vaste, et les débits d'échange sont alors importants.

Ce phénomène est appelé **drainance**.

Il convient en outre de distinguer deux types de pollutions vis-à-vis desquelles les stratégies de prévention et d'intervention relèvent de démarches sensiblement différentes : celles provoquées par une source ponctuelle et facilement localisable (fuites dans un site de stockage, terril de sel, pertes d'hydrocarbure à la suite d'un accident...) et les pollutions diffuses (engrais, pesticides...), généralement permanentes, qui se propagent à partir de surfaces très vastes.

● **Progression**

La trajectoire suivie par une pollution, et la vitesse avec laquelle elle peut se propager sont liées aux propriétés physiques du milieu, mais aussi à la nature du polluant, aux interactions possibles avec le milieu ou d'autres composants présents dans l'eau souterraine (adsorption, dissolution) et aux mélanges possibles avec des eaux de natures différentes (dilution).

La **porosité** et la **perméabilité**, précédemment décrites, déterminent la vitesse de filtration de l'eau à travers le milieu poreux que constituent les alluvions.

Du fait de la géométrie complexe des pores, la distribution des vitesses réelles de l'eau au sein du milieu poreux est hétérogène. Ceci

provoque un étalement du polluant autour d'une trajectoire moyenne. Ce phénomène est appelé **dispersion**. La **dispersivité** est l'aptitude du milieu à provoquer une dispersion. Elle se traduit par deux coefficients (figure 42) :

- le coefficient de dispersion longitudinal,
- le coefficient de dispersion transversal.

La concentration de polluant présent dans l'eau souterraine peut être modifiée (dans le sens d'une diminution ou d'une augmentation) par transformation au sein de la phase aqueuse, par échange avec les sédiments traversés, ainsi que par l'action des micro-organismes. Ces modifications dépendent de la nature du polluant.

Les réactions d'oxydo-réduction sont particulièrement importantes, car elles règlent l'**état d'oxydation** des différents composés. Celui-ci, de même que le **taux d'acidité** (pH), conditionne, les phénomènes d'adsorption, de désorption, de dissolution et la disponibilité biologique des différents composés.

Pour ce qui concerne la **migration des radionucléides** dans le milieu souterrain, deux facteurs principaux sont à considérer :

- la durée de vie de l'élément radioactif,
- l'importance des phénomènes de sorption.

Parmi les éléments radioactifs, on distingue ceux à comportement anionique, c'est-à-dire formant en solution des ions négatifs, et ceux à comportement cationique, c'est-à-dire formant en solution des ions positifs.

Les premiers migrent comme l'eau. Cependant, mis à part le ruthénium, ils sont en général à vie courte. C'est le cas en particulier de l'iode. La pollution est alors également de courte durée.

Les seconds, comme le césium, le strontium, le baryum et les terres rares sont plus ou moins fortement piégés par les phénomènes de sorption au niveau des sols, et par le temps de

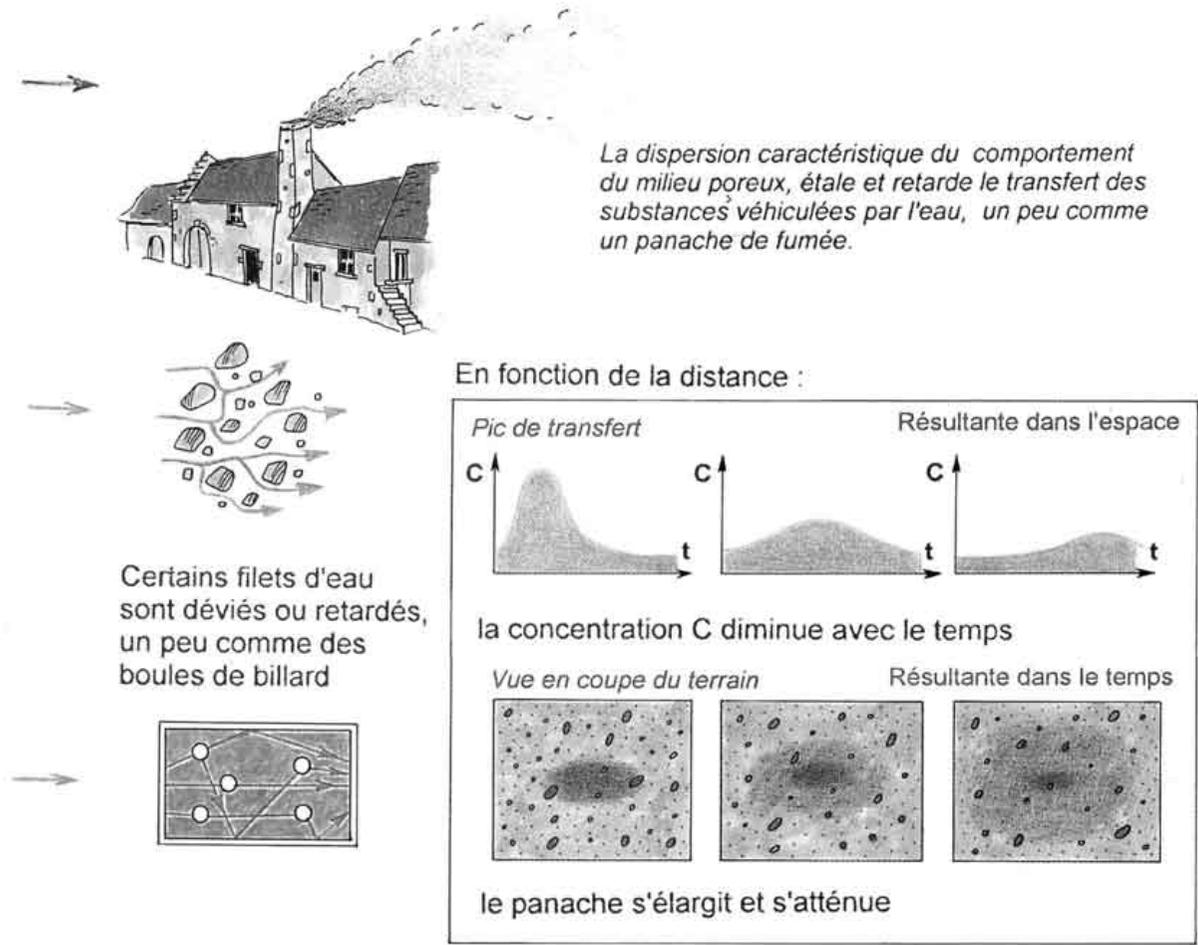


Fig. 42 : Progression d'une pollution

transit dans la zone non saturée. Dans la zone saturée, cette rétention a également lieu et elle s'évalue souvent en terme de retard, c'est-à-dire par le rapport entre la vitesse de migration de l'élément et la vitesse de migration de l'eau.

Vulnérabilité des nappes alluviales

● Protection naturelle

Les différents mécanismes mis en jeu au cours du transfert des polluants vers et au sein des aquifères alluviaux confèrent au sous-sol une protection naturelle, mais rarement absolue. Il s'agit plus généralement d'un ralentissement du processus de pollution ou de son immobilisation temporaire,

dont il est important de ne pas perdre de vue les conséquences à long terme.

Ces défenses naturelles du sous-sol sont présentées par le tableau 4 : "transfert des polluants vers et dans les eaux souterraines".

Les formations de couverture

Les caractéristiques des formations de couverture présentes entre la surface du sol et le toit de la nappe alluviale influent sur la progression d'un contaminant au cours de sa migration vers la nappe.

Dans la partie superficielle non saturée, la vitesse de transfert de l'eau est conditionnée par la **texture** du milieu poreux : la présence d'argile et de matière organique augmente le pouvoir de rétention du sol, alors que la fraction sableuse a l'effet inverse.

| | Interfaces | | Zone non saturée | Nappe |
|---------------------|---|--------------------------------|--|--|
| Milieu | Terre végétale ou sol | Berge de cours d'eau | Roche ± humide | Roche noyée |
| Sens de déplacement | ↓ | → | ↓ | → |
| Echelle spatiale | 0,1 m à ≈ 1 m | | 1 m à ≈ 1 m | 10 m à 100 000 m |
| Phénomènes en jeu | Biodégradation, fixation végétale, exportation adsorption | "Effet filtre" des berges ↙ | Retard, dispersion, biodégradation, fixation minérale et organique | Dilution, dispersion, délai, biodégradation adsorption |

Attention
 Dilution, dispersion et retard ne sont que des palliatifs souvent trompeurs

Tableau 4 : Transfert des polluants vers et dans les eaux souterraines - Défense naturelle du sous-sol - (cas des nappes sans toit étanche)

La **structure** joue également un rôle essentiel dans ces phénomènes. Par exemple, les fentes de retrait (dessiccation), ou les ouvertures créées par le travail mécanique du sol peuvent offrir des voies de circulation préférentielles.

Selon leur constitution, les formations de couverture présentent des propriétés d'adsorption et d'échange, leur permettant de retenir plus ou moins un certain nombre de substances, notamment certains métaux tels que le zinc, le plomb, le mercure (Zn, Pb, Hg) ou encore des composés organiques comme l'atrazine (pesticide).

La quantité de matière organique, ainsi que la teneur en argile du sol, sont déterminantes dans ces processus, de même que l'épaisseur des terrains présentant des caractéristiques favorables. Néanmoins, les équilibres liquide/solide varient en fonction des conditions du milieu. Par exemple, un changement

de composition du milieu peut se traduire par une désorption d'un composé précédemment adsorbé.

Une **microfaune active** est associée au milieu souterrain dans ses horizons les plus superficiels. Ces horizons sont le siège de réactions biochimiques liées à l'activité des micro-organismes. Le sol présente ainsi un rôle épurateur important vis-à-vis des nitrates. C'est le processus de **dénitrification**. Sous des conditions très particulières d'humidité, de température et d'anaérobiose, certaines bactéries consomment en effet l'oxygène des nitrates pour se développer, et rejettent l'azote ainsi produit sous forme de N₂ gazeux.

Les berges du fleuve

La frange d'alluvions formant les berges du cours d'eau peut présenter, du fait de son colmatage par les éléments fins apportés par le cours d'eau, un pouvoir filtrant mécanique.

En outre, les berges, ainsi que les dépôts vaseux qui les tapissent, sont susceptibles d'affecter, sous des conditions d'oxydo-réduction très particulières, le devenir de certains polluants par divers processus biogéochimiques tels que l'adsorption, la dissolution/précipitation ou la dégradation bactérienne. L'activité biologique, notamment celle de bactéries, joue un rôle prépondérant sur les caractéristiques du système.

Cette épuration naturelle contribue à la protection des nappes alluviales contre certaines pollutions chroniques ou accidentelles. L'élimination ou la rétention de polluant est cependant très variable en amplitude selon les sites.

La nappe alluviale : aspects quantitatifs et qualitatifs

De plus, les polluants immobilisés au niveau des sédiments des berges peuvent être remobilisés, sous l'effet d'autres substances présentes dans l'eau.

Les métaux tels que l'argent, le zinc, ou le mercure, peuvent être fixés dans des proportions importantes. Les teneurs en fer et manganèse peuvent au contraire augmenter du cours d'eau à l'aquifère.

Certaines substances organiques, telles que les hydrocarbures, peuvent subir une biodégradation dans cette zone riche en bactéries.

Nitrates et nitrites peuvent être totalement éliminés pendant la traversée des berges, par consommation bactérienne de l'oxygène qui entre dans leur composition.

Les alluvions

Le réservoir alluvial n'est pas lui-même un milieu homogène. Il présente au contraire de nombreuses hétérogénéités, propres à son mode de dépôt. Ainsi, localement, certaines zones peuvent présenter des propriétés de rétention vis-à-vis de certaines substances, jouant ainsi un rôle de piégeage. Bien entendu ces singularités locales ne font que reporter dans le temps les conséquences de la présence d'une pollution dans le sol.

Par ailleurs, les phénomènes de dégradation liés aux micro-organismes ne sont pas limités uniquement à la frange superficielle du sous-sol et aux berges du fleuve, mais peuvent également être observés au sein même de certains aquifères.

● Analyse de vulnérabilité

Les nappes alluviales sont généralement très vulnérables, car peu protégées vis-à-vis des pollutions de surface pour les raisons suivantes :

- surface libre proche de la surface du sol,
- alimentation par les coteaux avoisinants,

- liaison hydraulique avec les eaux de surface.

Le degré de vulnérabilité de ces nappes s'évalue à partir des critères suivants :

- l'environnement industriel, agricole et humain :

- . les sources possibles de pollution diffuse,

- . les risques de pollution accidentelle ;

- les possibilités d'entrée de la pollution dans la nappe :

- . existence ou absence de couverture imperméable de limons ou argiles,

- . caractéristiques de la zone non saturée,

- . forages défectueux au niveau de la tête de puits et de la cimentation,

- . gravières,

- . état naturel des berges du cours d'eau,

- . endiguements,

- . barrages ;

- les facteurs de propagation dans la nappe, et de migration vers les ouvrages de captage :

- . caractéristiques hydrodynamiques, hydrodispersives et physico-chimiques des formations alluviales,

- . nature des limites : barrières imperméables, fronts d'alimentation, exutoires,

- . piézométrie naturelle et ses fluctuations, sens d'écoulement, gradient hydraulique,

- . temps de renouvellement de l'eau,

- . sites des ouvrages de captage : puits, forages,

- . caractéristiques techniques de ces ouvrages,

- . débits pompés, influence sur la piézométrie.

Par ailleurs, on distingue parmi ces différents facteurs ceux qui sont des **indices de vulnérabilité intrinsèque**, c'est-à-dire liés aux caractéristiques naturelles de la surface

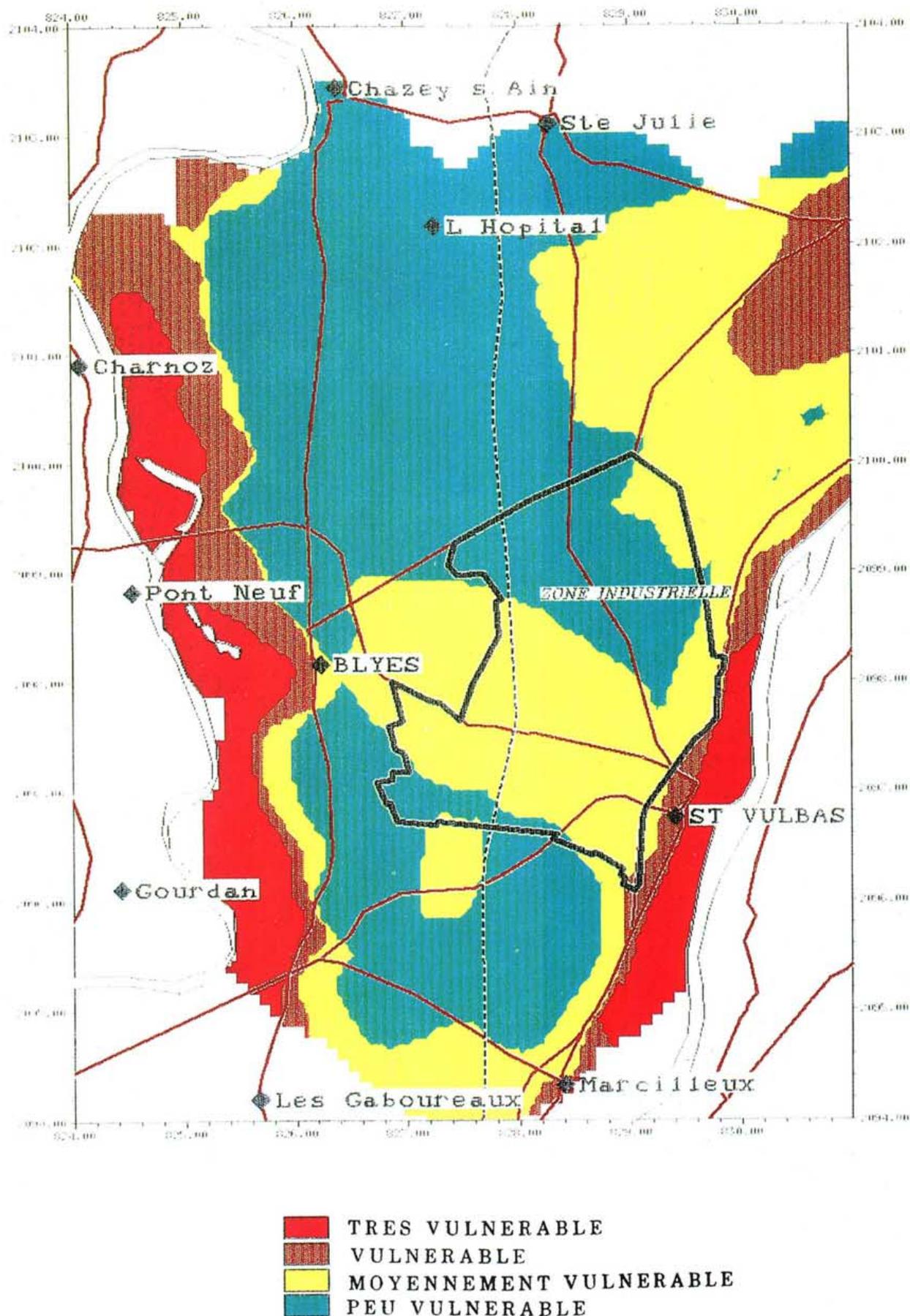


Fig. 43 : Vulnérabilité relative à la zone non saturée - échelle 1/50 000

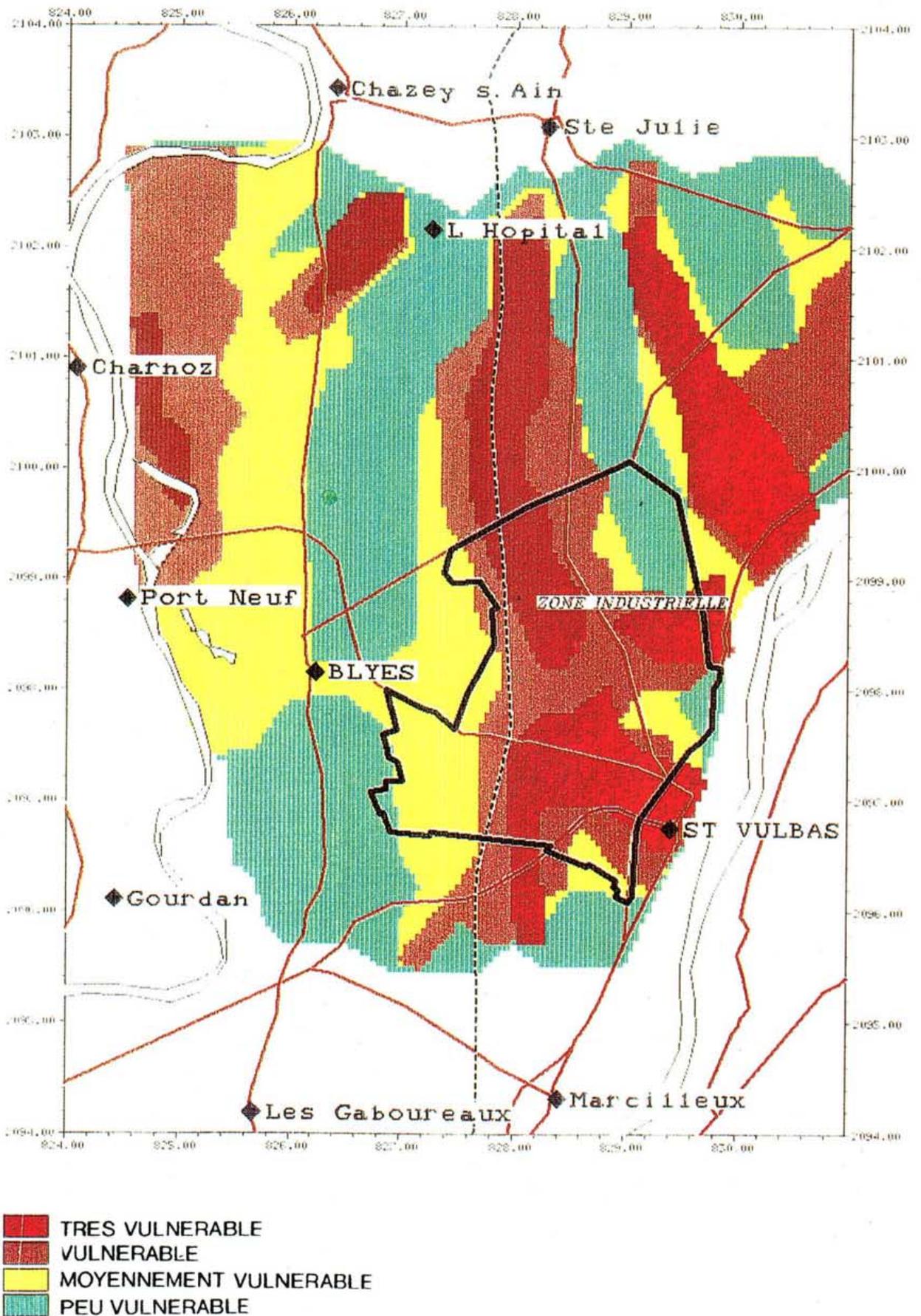


Fig. 44 : Vulnérabilité relative à la zone saturée - échelle 1/50 000

du sol, du sous-sol, de la nappe et des eaux superficielles, et ceux qui sont des **indices de vulnérabilité induite**, c'est-à-dire liés à l'aménagement et à la gestion de l'ensemble du système.

En attribuant, par zones, des classes de valeurs à ces différents indices, et en effectuant une moyenne pondérée de ces valeurs on peut ainsi définir, par zones, un **indice total de vulnérabilité intrinsèque**, de même qu'un **indice total de vulnérabilité induite** et finalement un **indice global de vulnérabilité**. Cet indice global de vulnérabilité sera évidemment défini relativement à un certain type de pollution possible.

Cette **analyse multicritère** peut se traduire, à l'aide des logiciels SIG (Systèmes d'Information Géographiques), par la confection de **cartes de vulnérabilité**, relatives donc aux différents types de pollution.

La difficulté de détermination et de représentation d'indice total ou global réside cependant dans l'attribution des coefficients de pondération aux différents facteurs. En pratique il sera donc souvent préférable de limiter la représentation multicritère, et d'éditer **plusieurs cartes de vulnérabilité**, prenant séparément en compte un seul ou quelques indices spécifiques.

Figures 43 - 44.

L a gestion et la protection des nappes alluviales et des captages AEP

Gestion quantitative de la nappe

La gestion et la protection des **captages d'eau potable** dans les nappes alluviales se situent au niveau :

- de **l'ensemble de la ressource** que constitue la **nappe alluviale**, compte tenu de tout son environnement et de son exploitation éventuelle pour d'autres usages,
- de **l'ouvrage de captage** lui-même, en tant que **cible éventuelle** d'un préjudice d'ordre quantitatif ou qualitatif.

Par ailleurs, la gestion quantitative et qualitative des nappes alluviales doit intégrer **l'ensemble de l'hydrosystème** que constituent les eaux souterraines et les eaux superficielles.

L'objectif de la gestion quantitative de la nappe est de permettre une utilisation durable de la ressource, c'est-à-dire de satisfaire, dans la mesure du possible, ou d'arbitrer, les demandes des divers usagers de l'eau, tout en évitant la surexploitation de la nappe.

Pour ce faire, il est nécessaire de pouvoir comparer à tout moment, ou pour certaines périodes de référence, les prélèvements effectués dans la nappe aux ressources offertes par celles-ci, et de pouvoir juger également de la possibilité de prélèvements supplémentaires éventuellement envisagés, en évaluant leur impact futur sur la nappe.

La gestion quantitative implique la connaissance :

- des réserves de la nappe,
- des ressources renouvelables,
- des ressources renouvelables exploitables,
- des caractéristiques hydrodynamiques des formations aquifères,
- des conditions aux limites de la nappe,