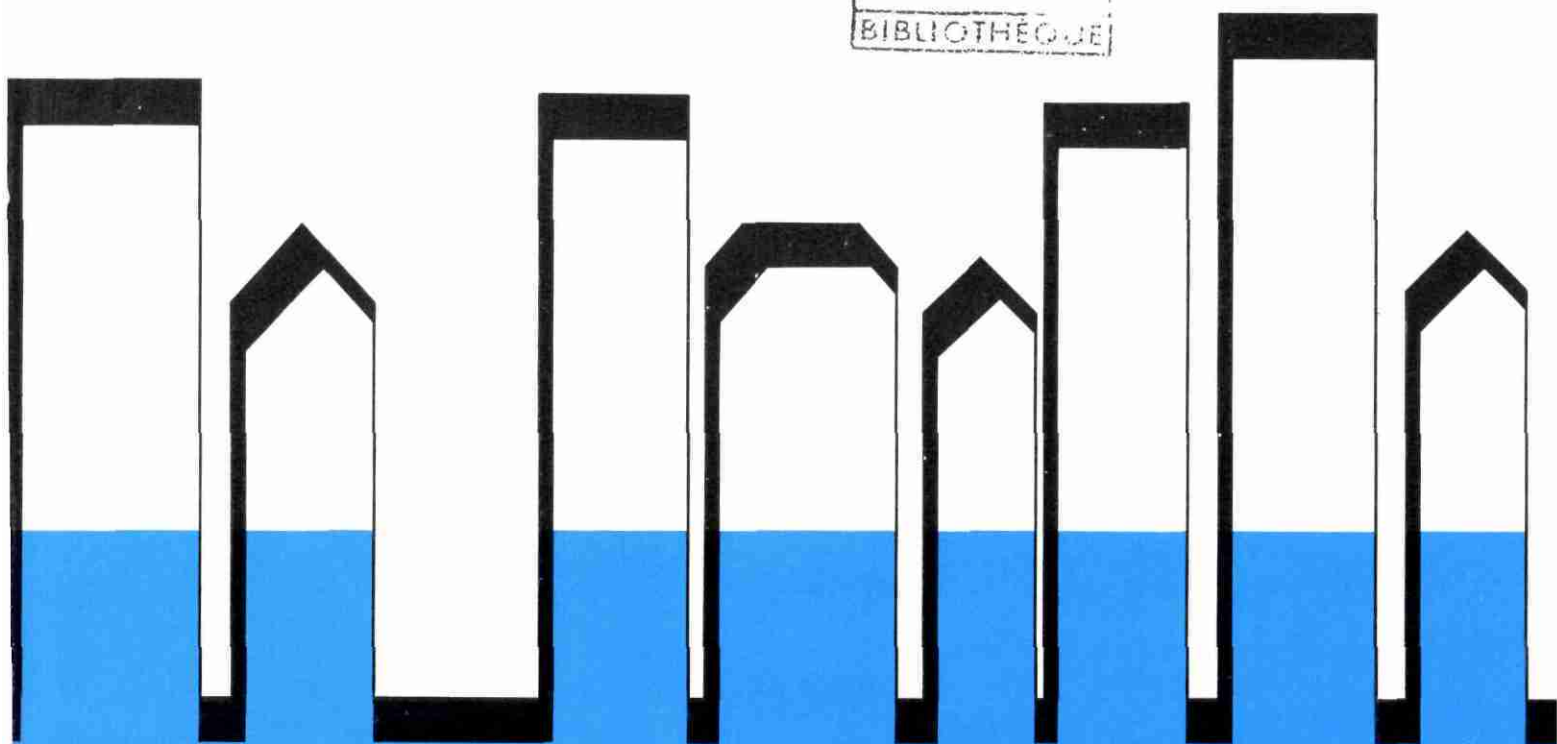
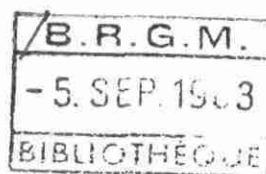


remontées des nappes d'eau souterraine

causes et effets



83 SGN 353 EAU



bureau de recherches géologiques et minières

CE RAPPORT EST SORTI DANS LA SERIE

DOCUMENT DU BRGM N°60

Il est disponible au service Editions/Vente
du Département Information Géologique

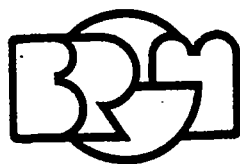
MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

DOCUMENT PUBLIC

REMONTÉES DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE CAUSES ET EFFETS

par

C. BERGERON - H. DEHAYS - T. POINTET



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département EAU

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél. : (38) 63.80.01

Rapport du B.R.G.M.

83 SGN 353 EAU

Juin 1983

SOMMAIRE

	pages
AVANT PROPOS	
INTRODUCTION	
1ère PARTIE : EXEMPLES DE REMONTEE DE NAPPE : CAUSES ET CONSEQUENCES	5
I - REMONTEE DE NAPPE DUE A DES CAUSES NATURELLES	7
1. Cas de la remontée de la nappe sous la commune de Nibas (Somme)	7
2. Autres exemples de remontée d'origine naturelle aux conséquences diverses	8
3. "Remontée" relative de nappe liée à des affaisse- ments de terrains	9
II - REMONTEE DE NAPPE DUE A L'ACTIVITE HUMAINE	11
1. Les remontées de nappe liées aux arrêts de pompage	11
2. Les remontées de nappe liées aux aménagements ..	23
3. Les remontées de nappe liées à des activités diverses	24
4. Multiplicité des conséquences liées aux remontées de nappes	28
2ème PARTIE : REMEDES ET PREVENTION	33
I - LES REMEDES	35
1. Les remèdes "actifs"	35
2. Les remèdes "passifs"	41
II - LA PREVENTION	42
1. Les mesures préventives directes	43
2. Les mesures préventives indirectes	44
3. Une meilleure information	50

AVANT-PROPOS

Dans les zones urbanisées de notre territoire national dont le sous-sol est occupé par des constructions sans cesse plus denses, les variations -souvent provoquées- des conditions naturelles initiales sont de plus en plus déterminantes et causes de nuisances pour les édifices.

C'est en particulier le cas des variations d'état des nappes d'eau souterraine dont l'étude est une importante application de l'hydrogéologie. Parmi ces variations d'état, de nombreux cas de remontées du niveau des nappes d'eau souterraine sont signalés et font l'objet d'observations de mesures et d'interprétations.

L'incidence économique de la nuisance provoquée tendrait à induire l'idée qu'il s'agit d'une calamité plus ou moins exceptionnelle et naturelle du même genre que les inondations. Il n'en est rien : en général, ces variations de niveau peuvent faire l'objet d'une prévision déterministe -par modélisation- ou stochastique, fondée sur des probabilités d'occurrence. De telles données sont à la disposition des aménageurs et sont -en particulier- élaborées dans le cadre de la mission de Service Public du BRGM. Dans ces conditions, on peut s'interroger sur la raison d'aussi nombreux désordres...

L'hydrogéologie moderne -quantitative- sait exploiter les données naturelles, sait prévoir les effets d'un aménagement. L'impact des grands travaux hydrauliques est mesurable "sur plan" et l'on peut prédire les conséquences économiques des ouvrages qui sont susceptibles de modifier le régime des eaux souterraines. Mais la prise en compte, dans les projets d'aménagement, des données concernant le sous-sol en général, et les eaux souterraines en particulier, est bien récente. Il y a quelques décennies, cette préoccupation n'était pas exprimée. Ainsi, actuellement, un certain nombre de désordres sont la conséquence de l'insouciance -ou de la méconnaissance des problèmes hydrogéologiques- des aménageurs d'hier. Le point le plus caractéristique de certaines remontées désastreuses de nappes souterraines réside dans le fait que le niveau de référence "naturel" n'était pas connu des aménageurs, tandis que le niveau qui régnait à l'époque des travaux était à l'insu des projeteurs artificiellement rabattu. Ceux-ci, fondant leurs plans sur des données biaisées, ont cru se mettre à l'abri des désordres liés aux fluctuations naturelles des nappes, alors qu'ils ignoraient être en domaine influencé.

C'est ainsi que d'importants prélèvements d'eau souterraine avaient déprimé la surface piézométrique sous l'agglomération parisienne. Les bâtisseurs -eussent-ils été scrupuleux au point de s'assurer du niveau local et momentanément des nappes- et les industriels qui ont cessé de pomper, ne peuvent être considérés comme responsables des nuisances, dues, paradoxa-

lement, à l'impact de la cessation des pompages. Ceci tendrait à prouver que la gestion des nappes est affaire collective, que la prise en compte globale des effets et des causes subies ou engendrées par les particuliers relèvent bien de la puissance publique, qui a seule la capacité d'appréhender toutes les dimensions de ce problème.

En tout état de cause, l'absence de relation directe entre des "responsables" qui ont mis fin, en cessant d'exploiter une nappe, à une "économie externe au Profit de tiers" et des "victimes" de l'arrêt de cette action, pose un délicat problème. Cela devrait au moins inciter à plus de rigueur dans la saisie et la diffusion d'informations sur la gestion du sous-sol et des nappes en particulier. L'existence de banques de données, de modèles de simulation de nappes, devrait permettre d'éviter la répétition de semblables erreurs... A nous de proposer d'ores et déjà les dispositions techniques pour que de nouvelles utilisations du sous-sol ou des eaux souterraines ne posent pas, à nos descendants, des problèmes similaires mais encore insoupçonnés. Ceci est un des aspects de la mission de Service Public confiée par l'état au BRGM.

J.J. COLLIN

INTRODUCTION

Il est apparu intéressant de réaliser un document qui décrit, à partir d'exemples, quelques aspects et conséquences de remontées de nappes, dans le but premier d'informer le public et les membres des collectivités concernées par la question : ingénieurs et techniciens de l'aménagement, des administrations, entrepreneurs, promoteurs, architectes, collectivités locales, industriels et autres organismes consommateurs d'eau souterraine.

Il comprend deux parties. La première est consacrée à la description de cas concrets et connus pour avoir été soumis au Service Géologique National. Il permet de passer en revue les différentes causes et conséquences des remontées de nappes. La seconde partie fait l'inventaire des remèdes les plus communément mis en oeuvre pour pallier les désordres et nuisances engendrés. A ces deux parties succède un certain nombre de précisions sur les actions à envisager de la part des responsables, décideurs et administrations pour que les phénomènes puissent être identifiés à temps, voire prévus, afin de posséder, au moment de tout aménagement, les données qui permettent :

- de choisir les techniques de construction et de protection appropriées,
- de connaître l'impact de l'intervention effectuée sur le milieu naturel.

Première partie

**EXEMPLES DE REMONTEE
DE NAPPE
CAUSES ET CONSEQUENCES**

"L'eau est source de vie mais aussi de bien des ennuis". Les remontées des nappes et leurs conséquences illustrent en partie cet adage, notamment dans les zones où celles-ci se situent naturellement à faible profondeur soit sous la surface du sol, soit près des bases des constructions souterraines. Des constructions hâtives réalisées en période de basses eaux pluriannuelles, des aménagements effectués sans le souci de leur environnement souterrain, des interventions humaines mal conduites sur une nappe et des évolutions à long terme de certains équipements, qui eussent été imprévisibles lors de leur création, peuvent être la cause et le théâtre d'inondation, de gêne dommageable à l'homme. Les remontées de nappe peuvent aussi être naturelles : recharge importante par précipitations et infiltration exceptionnelles. Les deux types de causes : causes naturelles et causes liées à l'activité humaine peuvent coexister.

Les exemples présentés ici ont été choisis parmi d'autres en raison des multiples aspects qu'ils permettent d'aborder.

I - Remontée de nappe due à des causes naturelles

Ces causes naturelles sont essentiellement représentées par des précipitations dont la hauteur -évaluée en pluie efficace- est très supérieure à une valeur "moyenne" pour laquelle de tels désordres n'apparaissent pas : il s'agit d'alimentation exceptionnelle des nappes.

1 - Cas de remontée de la nappe sous la commune de Nibas (Somme)

La commune de Nibas, implantée sur le plateau du Vimeu, subit épisodiquement mais depuis toujours, des inondations dans la partie méridionale du village ; celui-ci occupe un vallon "sec" issu de la jonction de trois vallons primaires. La rue principale, qui parcourt le coeur du vallon, recueille les eaux émergeant des bas côtés et les canalise sur près de 1 km (fig. 1a) avant qu'elles ne s'engouffrent dans un égout d'eaux pluviales (fig. 1b).

CADRE GEOLOGIQUE ET CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Le substratum géologique du Vimeu est constitué par la craie du Sénonien, pauvre en silex au niveau de Nibas. Dans ce substratum, on relève, au droit du village, un réseau de fractures bien développé. La craie dans son ensemble constitue un réservoir aquifère



Figure 1 a - Rue principale de Nibas (Somme) canalisant les eaux émergeant des bas côtés



Figure 1 b - Un réseau de collecte des eaux de surface pour acheminer les eaux issues de la nappe

alimenté par les précipitations et drainé par le vallon. Elle est caractérisée par une certaine hétérogénéité structurale qui se traduit, dans les circulations d'eau souterraine, par des anomalies de gradient hydraulique, de perméabilité et de niveau piézométriques. Les manifestations du phénomène s'expriment par des débordements et ne se produisent qu'à l'amont du village. Une très longue série d'observations du niveau piézométrique a permis de constater une bonne relation entre les périodes d'inondation et les hautes eaux interannuelles (années 1926, 1927, 1928, 1931 et plus récemment 1967, 1968, 1970, 1975, 1980, 1981 et 1982).

EXPLICATIONS DU PHENOMENE

L'apport des pluies efficaces soumet la nappe à des variations saisonnières et à des variations pluriannuelles très sensibles. Les séries d'années pluvieuses (ex : 1980-81 et 1982) provoquent une forte remontée de la nappe (4 à 5 m sur le plateau, 2 m dans le vallon). La nappe affleure alors et des sources temporaires apparaissent. L'émergence de ces sources est due, selon toute vraisemblance, à l'existence conjuguée d'une couche de craie compacte recristallisée et donc peu perméable, à faible profondeur, venant à l'affleurement vers le centre du village, et de la zone faillée, également de faible perméabilité, orientée S.SW-N.NE située à l'ouest du fond du vallon.

CONSEQUENCES

La principale conséquence du phénomène de remontée de la nappe est l'apparition d'inondations. Lorsque celles-ci se manifestent, elles persistent à chaque fois plusieurs mois et provoquent des perturbations dans la vie locale. Des caves mais aussi des maisons et magasins sont noyés. La chaussée se transforme en collecteur et subit des dégradations.

Ce phénomène naturel n'a qu'un caractère semi-exceptionnel puisque sa période de retour est de 10 ans environ.

2 - Autres exemples de remontée d'origine naturelle aux conséquences diverses

Les régions Nord-Pas-de-Calais, Picardie et Normandie fournissent de multiples exemples de remontée de la nappe de la Craie (années 1980, 1981, 1982) qui s'expliquent par la conjonction de deux faits :

- reconstitution des réserves pluriannuelles en eau souterraine, après des années déficitaires
- réalimentation importante par les précipitations d'automne de plus de deux fois supérieures à la moyenne.

Ainsi dans certains cas, les lits temporaires des vallons sont-ils comblés en période sèche soit accidentellement par les travaux de labours, soit pour faciliter le passage des engins agricoles. Lors des réapparitions des sources en amont, les eaux débordent de part et d'autre des lits et submergent les surfaces cultivées. Un simple entretien annuel des lits en fin de période sèche permettrait d'éviter ces inondations.

Enfin il est possible que la remontée de la nappe de la Craie, dans les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure, soit à l'origine d'effondrements. Les périodes de hautes eaux sont fréquemment accompagnées de désordres de surface correspondant soit à une déstabilisation du karst à la suite du lessivage des couches argileuses basales, soit à l'effondrement de conduits souterrains artificiels minés par les eaux.

Dans la région Centre, à la Chapelle-Saint-Sépulcre, près de Montargis, après la longue période pluvieuse des années 1977 à 1981, la forte mise en charge de l'aquifère a entraîné des débordements et des inondations dont l'importance, en surface, a été accrue par l'absence de passages hydrauliques sous les voies de communication (buses ou radiers submersibles) (fig. 2a, fig. 2b).

3 - Remontée relative de nappe liée à des affaissements de terrains

L'étude des alluvions des rivières lorraines montre qu'elles présentent une structure très complexe, une extension maximale en surface et une puissance importante dans les secteurs où ces cours d'eau recoupent les marnes du Muschelkalk et du Keuper (Trias). Ce suralluvionnement local semble compenser les mouvements du sol liés à la dissolution des évaporites en profondeur ; ce processus paraît être confirmé par :

- les nombreuses sources salées exploitées depuis -900 av JC jusqu'au XVIIIème siècle dans les vallées de la Sarre et de la Seille,
- les mouvements négatifs du sol enregistrés localement et en particulier à Saltzbronn, dans la vallée de la Sarre.

Un phénomène semblable a été constaté dans la vallée de la Vallière à Montmorot (Jura) où les sondages de reconnaissance ont montré l'existence d'une cuvette remplie d'alluvions, sur près de 30 m dans le substratum. Or, légèrement en amont des salines de Montmorot, la Vallière coule sur les calcaires du Lias inférieur, et dès l'aval, les marnes du Lias supérieur ont été trouvées à 3 m de profondeur. Cette cuvette coïncide presque avec la culmination d'un dôme des formations salifères mettant ainsi en évidence un affaissement naturel du sol lié à la dissolution des formations sous-jacentes ; la présence d'une source salée confirme cette assertion. Paradoxalement, l'exploitation de nappes alluviales dans cette situation, par pompage au droit des zones de dissolution préférentielle, risque d'induire une remontée relative du niveau piézométrique, provoquée par un affaissement du sol consécutif à la formation de fontis de dissolution dans les formations salifères.

Exemples de remontée naturelle de la nappe



Figure 2 a - Vue de la route "montagneuse" près de la Chapelle Saint Sépulcre, entièrement submergée (Loiret)



Figure 2 b - Inondation du terrain de motos-cross de Puy la Lande à la Chapelle Saint Sépulcre (Loiret)

II - Remontée de nappe due à l'activité humaine

Le développement économique implique une intervention sans cesse croissante de l'homme sur le milieu souterrain. Celui-ci est en effet sollicité pour l'extraction des ressources minérales et énergétiques, et pour l'exploitation de l'eau qu'il renferme. De plus, l'espace souterrain est devenu une zone d'habitat si bien qu'aujourd'hui on évoque volontiers le concept d'urbanisme souterrain, et le sous-sol est considéré comme une ressource en espace d'autant plus utile que le sol est plus encombré. Les aménagements de surface, tout comme les activités touchant au sous-sol et en particulier à l'eau souterraine, peuvent occasionnellement avoir des répercussions néfastes sous la forme de remontées de nappes. Celles-ci se manifestent soit par des inondations, soit par l'envoyage d'édifices souterrains entraînant l'apparition de désordres dans la stabilité des constructions elles-mêmes et de leur environnement, illustrés par les exemples qui suivent.

1 - Les remontées de nappe liées aux arrêts de pompage

On distinguera trois types d'arrêt de pompage : les arrêts de pompage miniers, les arrêts de pompage destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) et les arrêts de pompages industriels.

☆ LES ARRETS DE POMPAGE MINIER (EXHAURE) : EXEMPLE DE LA VILLE DE SAINT-ETIENNE

Jusqu'à ces dernières années, le sous-sol de la ville de Saint-Etienne a été exploité pour sa richesse en charbon. Au cours de la phase d'exploitation, qui s'est effectuée jusqu'à 800 m de profondeur, les Houillères ont dû évacuer un important cubage d'eau de la nappe contenue dans le terrain Houiller, qui a fortement rabattu la nappe de sub-surface qui se trouve en relation étroite avec elle.

A l'arrêt des travaux miniers, les pompages cessant, les eaux sont remontées et ont ré-affleuré non seulement sur des terrains qui à l'origine étaient plus ou moins marécageux, mais aussi bien sur dans les sous-sols du Palais des Sports où l'on a été contraint d'extraire, dans un premier temps, un débit de 150 m³/h.

Les constructions avaient donc bénéficié, lors de leur édification, de conditions d'assainissement "trompeuses" car artificielles, et non maîtrisées par les aménageurs. Afin de remédier à cet état désastreux, les Houillères ont dû reprendre certains pompages, et des particuliers ont été conduits à pomper également. L'assainissement des points bas de la ville de Saint-Etienne a été envisagé par drainage technique, qui ne pourra être réalisés toutefois qu'après

l'achèvement d'un nivellement précis. Actuellement, à Saint-Etienne, existe une situation conflictuelle entre les organismes qui ont provoqué -autrefois- ces forts rabattements et ceux qui ont entrepris -hier- la construction de pavillons sur des zones dont on avait "oublié" les caractéristiques hydrogéologiques naturelles, et qui bénéficiaient sans le savoir d'"avantages externes"... mais surtout gratuits.

L'exemple de Saint-Etienne est extrêmement significatif car il met en évidence l'absence d'un outil législatif concernant l'exploitation à très long terme des eaux souterraines et sa conséquence sur le Foncier.

★ LES ARRETS DE POMPAGE POUR A.E.P. (ALIMENTATION EN EAU POTABLE) : EXEMPLE DES ARRETS DE POMPAGE DU CHAMP CAPTANT DE GRAND CAMP A LYON

Le service des Eaux de la Communauté urbaine de Lyon (Courly) a procédé à l'arrêt des pompages de Grand Camp à Villeurbanne, qui prélevaient depuis de nombreuses années 6 000 m³/h dans la nappe des alluvions du Rhône. Jusqu'alors, par ce moyen, le niveau de la nappe était rabattu artificiellement. L'arrêt des pompages devait créer une remontée du niveau piézométrique dont les répercussions sur les immeubles alentours étaient a priori inconnues, puisqu'il n'y avait jamais eu de description de la situation initiale naturelle de la nappe, en particulier par l'absence de document cartographique de la piézométrie avant la mise en service du captage. Des études hydrogéologiques ont donc été entreprises afin de fournir, aux autorités responsables de l'aménagement, les cotes de la nappe, lorsque les pompages seraient arrêtés et lorsque s'instaurerait un nouvel état dynamique. Après calcul des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, mettant en évidence les relations étroites entre la nappe et les potentiels hydrauliques imposés par le Rhône, des simulations numériques sur modèle calé ont permis de conclure sur les conséquences dommageables liées au terme de l'exploitation, de tracer la cartographie des courbes d'équi-remontée et de prendre les mesures nécessaires pour protéger les caves d'immeuble et les parkings souterrains du quartier du Tonkin.

Le cas de Lyon est exemplaire par les actions d'information et les mesures préventives qui ont précédé l'arrêt effectif. La remontée de la nappe, qui a atteint 5 m au niveau des pompages, a pu provoquer quelques inondations de sous-sol mais les prévisions ont indiqué à temps les points particuliers à protéger par la mise en place de systèmes de pompage ou d'étanchéité.

★ LES ARRETS DE POMPAGE INDUSTRIEL : EXEMPLES DE LA VILLE DE PARIS

Les unités industrielles, grosses consommatrices d'eau, se sont implantées, dans une certaine mesure, là où cette matière est la plus facilement accessible et disponible, c'est-à-dire sur les zones alluviales où l'eau souterraine est abondante et généralement à faible profondeur (de quelques mètres à la dizaine de mètres). Ce fait n'est toutefois pas systématique car parfois les

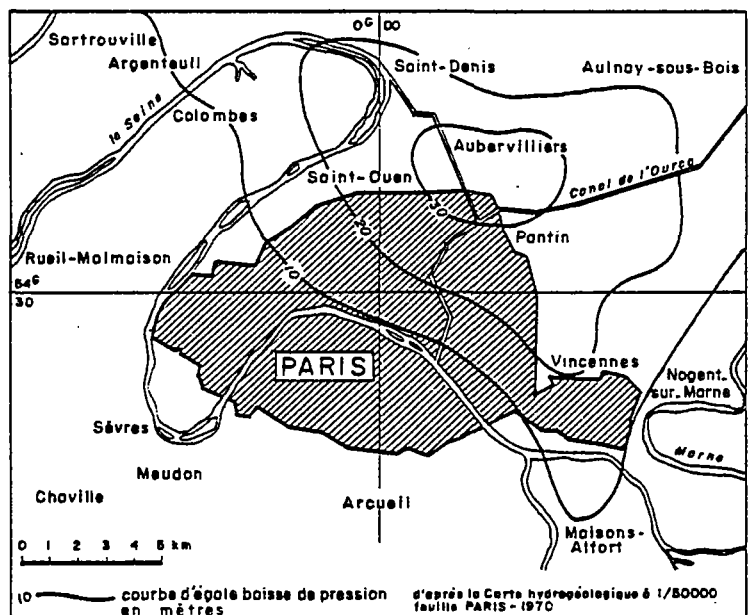
industries ont choisi la solution de recours à des nappes "profondes" ou, tout au moins, non alluviales c'est-à-dire les nappes des formations tertiaires et secondaires des grands bassins sédimentaires.

Mais revenons aux nappes dites "superficielles". Pour des raisons de dépendance évidente, les plaines alluviales sont généralement très urbanisées avec tout ce que cela sous-entend de densité d'occupation du sol et du sous-sol.

La coexistence des deux structures, industrielle et urbaine, ne va pas sans poser de problème de par les interactions qui en émanent. Les remontées de nappes, consécutives aux arrêts des captages industriels, en sont un exemple. Plusieurs facteurs rendent ce problème particulier très préoccupant, difficile à maîtriser et à prévoir. Préoccupant en raison des multiples conséquences du phénomène (inondation, déstabilisation, dommages aux édifices et installations souterraines urbaines), difficile à maîtriser et à prévoir de par le caractère souvent aléatoire d'une fermeture d'usine, mais aussi par l'imprévoyance des aménageurs, liée à la méconnaissance des sources d'information possible.

Sous la ville de Paris, la remontée des nappes phréatiques est essentiellement la conséquence de l'activité humaine, même si des influences naturelles telles que les périodes pluvieuses et les crues de la Seine ont un rôle certain. L'état des nappes en régime non perturbé avait été décrit par la carte hydrogéologique du département de la Seine levée en 1857 par M. DELESSE. A cette époque, les nappes des formations tertiaires et des alluvions étaient drainées par la Seine, et les surfaces piézométriques sous Paris étaient proches de la cote + 29 NGF, soit environ à 4 m au-dessus du niveau du fleuve. Au fur et à mesure de l'urbanisation et de l'industrialisation, entraînant la multiplication des prélèvements d'eau par pompages et l'accentuation de l'imperméabilisation de grandes superficies par revêtement, le niveau moyen des nappes s'est abaissé régulièrement pour atteindre la cote + 19 NGF au centre de la ville et même la cote 0 NGF vers le nord-ouest (Saint-Ouen, Aubervilliers). La figure 3 illustre l'abaissement de la nappe des sables yprésiens en un siècle.

Figure 3 - Croquis schématique de la région parisienne : abaissement de la nappe des sables yprésiens depuis un siècle (d'après P. DIFFRE, 1969)

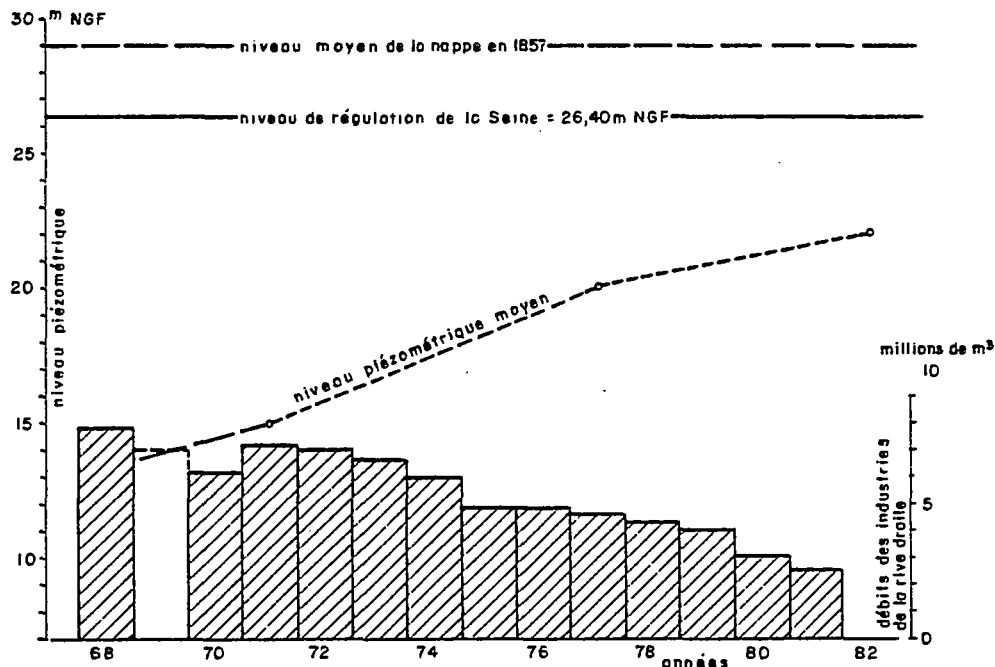


Entre 1960 et 1972, on a peu pris garde au fait que les niveaux piézométriques étaient abaissés, tantôt involontairement par des prélèvements pour l'industrie, pour la climatisation, tantôt volontairement par des rabattements provisoires destinés à la réalisation d'ouvrages d'art (RER, métro, Halles, etc.) ou des rabattements permanents (réseau de la RATP). Dans le même temps la diminution progressive des surfaces disponibles au jour, faisait se développer ce qu'il convient d'appeler l'urbanisme souterrain (parkings, bureaux, magasins de stockage, etc.). Ce développement apparaissait d'autant plus aisé que l'eau était visiblement absente. De ce fait, les réalisations ne furent que rarement dotées de mesures de protection particulières (cuvelage, ancrage, radier drainant).

■ LES CAUSES

A partir de 1972, on a constaté une remontée progressive des nappes qui, actuellement, est de 6 à 7 m en moyenne, et qui atteint même une dizaine de mètres dans certains secteurs où elle est provoquée par la réduction ou l'arrêt progressif des prélèvements d'eau par forages (fig. 4).

Figure 4 - Ville de Paris-rive droite - Evolution des débits prélevés et du niveau piézométrique de la Seine



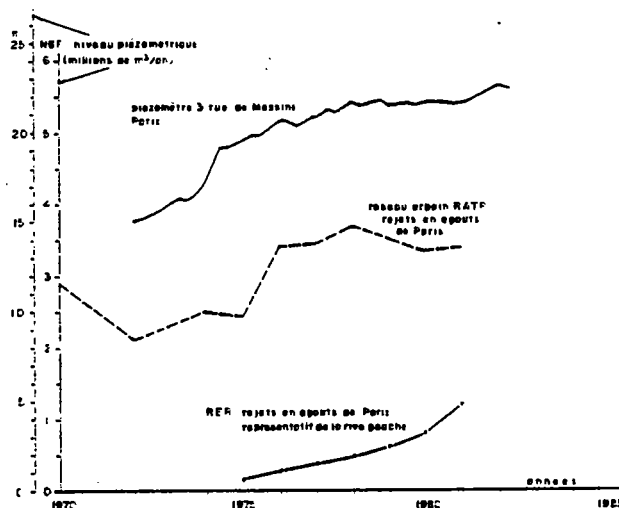
● Prélèvements industriels : la diminution très sensible des volumes prélevés est liée aux fermetures des usines, à leur déplacement (décentralisation) ou à l'emploi, dans leur fonctionnement, de nouvelles techniques ne nécessitant pas d'eau ou la recyclant, en particulier dans le cas de la climatisation et de la réfrigération.

● Prélèvements pour les grands travaux souterrains : les travaux une fois achevés, les exhaures sont supprimées. Compte tenu de l'importance de certaines fouilles (Halles) et tunnels (RER), on peut imaginer les conséquences importantes des arrêts de pompage sur la remontée des nappes. Mais avant cela

la seule mobilité des chantiers lors des percements des tunnels, accompagnée d'exhaure et de "remise en eau" provoquent des perturbations dans le régime des eaux souterraines très apparentées à des remontées de nappe.

Ces remontées des nappes sous Paris sont pourtant modulées par la persistance des pompages et des drainages effectués sur les réseaux de la RATP et du RER. Les débits d'exhaure, du fait des remontées amorcées, sont en augmentation depuis la dernière décennie : en 1972, c'est-à-dire pour une nappe très déprimée, les seuls rejets de la RATP dans les égouts de Paris étaient de l'ordre de 2,1 millions de m^3 alors qu'en 1981 ils atteignent 3,4 millions de m^3 (fig. 5). Ces débits d'exhaure contribuent à limiter les remontées de la surface piézométrique et par conséquent maintiennent hors de l'eau une grande partie de l'urbanisme souterrain qui fut réalisé à une période où les nappes étaient fortement rabattues.

Figure 5 - Ville de Paris-rive droite - Exhaure par le réseau urbain de la RATP et du RER. Variations annuelles depuis 1970



Certaines années, la réalimentation des nappes par les précipitations contribue temporairement à faire remonter les niveaux piézométriques, sans toutefois avoir des effets de même importance que ceux occasionnés par les arrêts de pompages. Lors des quatre dernières années (1978 à 1982), les précipitations -excédentaires- ont rechargé les nombreuses nappes perchées du Tertiaire, en particulier au nord de Paris (Gonesse, Aulnay, Pantin) et dans le 17ème arrondissement (Parc Monceau).

■ DES CONSEQUENCES FREQUENTES EN MILIEU URBAIN

● Les venues d'eau

A Paris, en rive droite de la Seine, les venues d'eau observées dans les sous-sols, depuis 1972, sont de plus en plus fréquentes et représentent la conséquence la plus visible de la remontée des nappes (fig. 5). De plus en plus

d'ouvrages souterrains (parking, caves, etc.) sont touchés par ce phénomène. On constate que les édifices endommagés sont récents, ce qui est un trait caractéristique de la concurrence croissante pour l'occupation du sous-sol.

Un immeuble parmi d'autres, situé dans la partie haute des Champs-Élysées vers l'Etoile, a été édifié, semble-t-il, en toute ignorance des répercussions possibles des variations piézométriques : lors des travaux de reconnaissance (fig. 6), le niveau de la nappe était à la cote + 17 NGF (le niveau de cette même nappe, au siècle dernier avant prélèvements intensifs, était voisin de + 29 NGF). Le radier fut posé à la cote + 14 NGF et un cuvelage étanche fut réalisé jusqu'à la cote + 19,50 NGF.

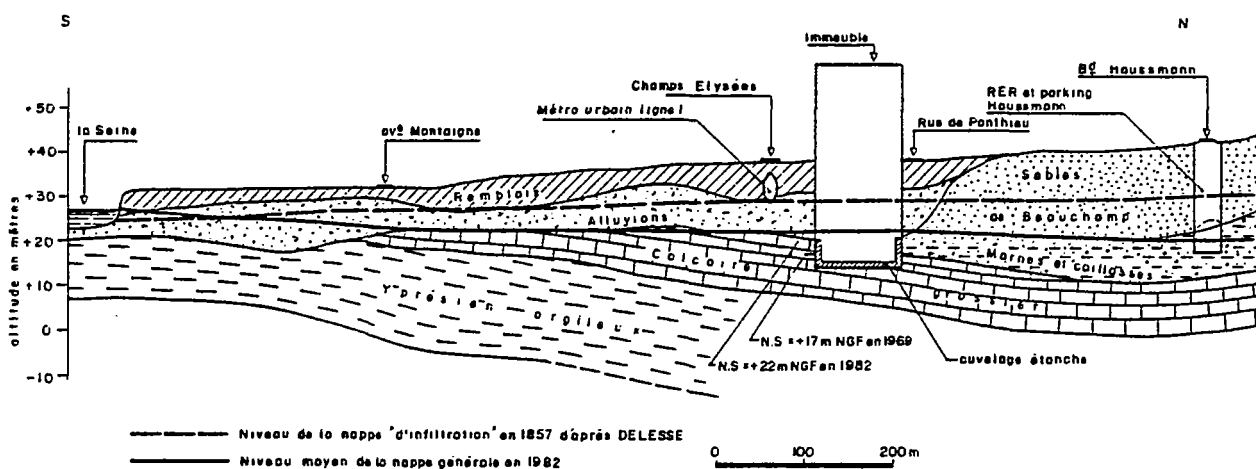


Figure 6 - Ville de Paris-rive droite - Evolution des niveaux piézométriques de la Seine (d'après P. DIFFRE, 1978)

A la fin de l'année 1973, des infiltrations se sont produites au-dessus de ce cuvelage puis sont progressivement remontées pour atteindre actuellement la cote + 22 NGF rendant inutilisables plusieurs niveaux de parkings (fig. 7a, fig. 7b, fig. 7c). Si la diminution des prélèvements pour les industries se poursuit, il est fort probable que les remontées de nappe atteindront une cote proche de l'altitude de régulation de la Seine, soit 26,39 NGF, excepté lorsque des potentiels bas resteront localement imposés par les dispositifs de drainage de la RATP.

Les venues d'eau sont les manifestations essentielles et immédiatement appréciables des remontées de nappes mais d'autres conséquences, moins palpables tout en étant aussi préjudiciables, peuvent survenir. Elles portent sur la

Ville de Paris rive droite - Parkings souterrains inondés



Figure 7 a - À proximité du Boulevard Poissonnière

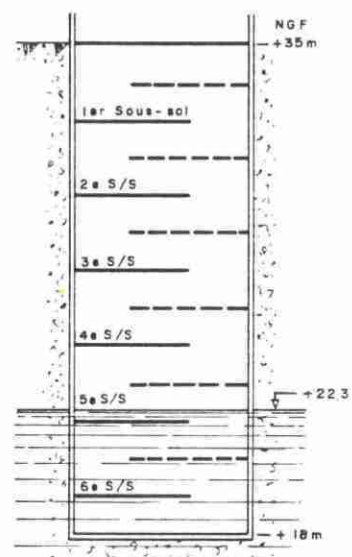


Figure 7b - Coupe du parking montrant les niveaux inondés



Figure 7 c - Place de La Madeleine : Venues d'eau à la liaison radier - pilier de soutènement

stabilité et la pérennité des bâtiments et sont très variées suivant le type de bâtiment et de fondation concernés et suivant le niveau atteint par l'eau. Chaque cas est particulier.

● Réduction de la capacité portante des fondations

Cette menace survient dès que la surface piézométrique se rapproche du niveau de fondation. Dans le cas extrême où le niveau de la nappe atteint le niveau d'assise, la fondation perd près de la moitié de sa capacité portante. Cette capacité portante est directement proportionnelle à la densité du sol de fondation et si celui-ci est situé sous le niveau de la nappe il faut considérer dans les calculs son "poids spécifique déjaugé" (de 1 à 1,2 t/m³) au lieu de son "poids spécifique apparent" (de 1,7 à 2,1 t/m³). Outre cet effet, les sols argileux voient leurs caractéristiques mécaniques chuter très rapidement lorsque leur teneur en eau augmente ; la perte de capacité portante peut être alors presque totale.

Les contraintes appliquées au sol étant devenues très supérieures à celles qu'il peut désormais admettre, les phénomènes de tassement, souvent différentiels, deviennent très probables si le coefficient de sécurité des fondations est insuffisant. Ils s'accompagneront de graves désordres pouvant remettre en question l'utilisation, voire la stabilité, de l'ouvrage si la structure de celui-ci n'est pas suffisamment souple ou au contraire suffisamment rigide.

Tous les types de fondation sont influencés : pieux, semelles ou radiers. Cette influence commence dès que le niveau piézométrique se situe à une distance inférieure à 2 fois la largeur de la semelle ou 1 fois la largeur du radier. Pour les pieux, le phénomène est plus complexe car il dépend du groupement de ces pieux et de leur mode de travail.

Enfin rappelons que lorsque leur teneur en eau augmente, certains sols argileux peuvent développer sous les fondations, des pressions de gonflement de 2 à 15 t/m² dont les conséquences sont des soulèvements différentiels très délicats à contenir ou à subir.

● Sous pression, soulèvement du bâtiment et noyage des sous-sols

Si la surface libre de la nappe dépasse le niveau du premier plancher ou du radier du bâtiment, la diminution de capacité portante des fondations s'accompagne de sous pressions qui tendent à soulever le bâtiment (poussée d'Archimède) et qui conduisent à des efforts importants dans les structures des radiers et des planchers. Ainsi un ouvrage de 900 m² d'emprise avec deux niveaux de sous-sols situés sous la surface piézométrique subit une poussée ascendante de 4 500 t, soit environ le poids de 4 à 6 étages (sous-sols compris).

Ce risque de soulèvement est particulièrement sensible au cours de la construction quand le bâtiment n'a pas son poids définitif et pour les parkings souterrains non surmontés d'un immeuble.

Dans ce calcul simple, la surcharge ascendante appliquée aux radiers ou planchers est de 5 t/m^2 , ce qui est inadmissible pour les structures courantes ; on peut donc s'attendre, à court terme, à observer une fissuration ou une rupture de ces éléments et l'inondation des sous-sols.

● Liquéfaction du sol de fondation

Les fondations des machines vibrantes ou des immeubles soumis à d'importantes vibrations (trafic routier, tir de mine ou de carrière, battage de planches ou de pieux) sont très sensibles aux remontées de nappe : si le sol est saturé dans la zone de propagation des vibrations, celles-ci créent d'importantes pressions interstitielles qui peuvent être supérieures à la pression des terrains eux-mêmes. Le sol perd alors instantanément sa capacité portante et la rupture des fondations est immédiate.

● Dissolution et fontis

Certains niveaux géologiques, soit servant directement d'assise aux fondations, soit situés sous les niveaux d'assise, renferment des quantités importantes de minéraux solubles au premier rang desquels vient le gypse (capacité de dissolution $2,5 \text{ g/l}$).

La remontée d'une nappe dans un terrain gypseux active ces phénomènes de dissolution qui peuvent rapidement conduire à la création de cavités franches ou diffuses sous les fondations ou sous les niveaux servant d'assises. Le risque de rupture (fontis) ou de tassements importants devient alors très critique. Simultanément, les eaux qui ont percolé à travers ces niveaux se chargent en sulfates et deviennent très agressives vis-à-vis des bétons ordinaires. Cette attaque est très difficile à enrayer sur les ouvrages existants et les pieux, qui sont les plus sensibles à ce phénomène.

● Corrosion des bétons

Les analyses chimiques, réalisées sur les eaux de la nappe de Paris à Neuilly, indiquent une pollution chimique (H_2S , Na, matières organiques) et bactériologique (bactéries sulfato-réductrices) devant être considérée comme dangereuse pour les bétons ordinaires. La plupart de ces eaux sont en sursaturation par rapport à la calcite et au gypse, donc susceptibles de déposer ces minéraux et

d'être les vecteurs du processus d'altération du béton. L'examen des échantillons de béton prélevés à Neuilly et au Parc des Expositions (porte de Versailles) montre que le liant du ciment n'est plus constitué uniquement d'alumino-silicates calciques mais aussi de calcite finement cristallisée. Cette transformation peut modifier non seulement les propriétés mécaniques du matériau mais aussi sa texture, sa porosité et faciliter des processus de corrosion des parties métalliques.

Cet aspect de la corrosion des bétons n'est certainement pas à négliger sur des constructions souterraines réalisées hors d'eau avec des bétons ordinaires et qui, par le jeu des remontées piézométriques, se trouvent ou vont se trouver partiellement noyés.

La stabilité d'un talus dépend très étroitement de ses conditions hydrogéologiques.

Une remontée de nappe très limitée peut rapidement entraîner la rupture de ce talus même si à l'aplomb de la tête de talus le niveau de la nappe se situe sous le niveau du pied de talus. Bien sur, plus la nappe devient haute et son gradient hydraulique important, plus la rupture du talus devient inéluctable (conjonction des forces d'écoulement et du déjaugage des terrains).

● Dispositions constructives ou confortatives

Il existe des parades à la plupart des situations que nous venons d'entrevoir. Elles seront plus longuement exposées dans la partie "remèdes". Mais citons parmi celles qui sont le plus fréquemment utilisées

- pompage périphérique en vue du rabattement de la nappe
- puits de décharge avec pompage d'exhaure
- barbacanes dans les voiles des sous-sols et collecte des eaux
- inondation périodique et volontaire des sous-sols
- ancrage par tirants passifs ou tirants précontraints et cuvelage étanche du radier afin de résister globalement et localement aux sous pressions
- lestage du bâtiment en cours de construction
- drainage des talus (drains subhorizontaux, éperons drainants)
- injection des vides de dissolutions.

D'une manière générale et dans la mesure du possible, on préférera le drainage et l'exhaure des eaux à une solution d'ancrage ou d'étanchéité qui est toujours très délicate à mettre en oeuvre surtout après construction (figures 8a, 8b, 8c). Les rabattements de nappes doivent de préférence s'effectuer avant que la nappe n'ait commencer à influencer la capacité portante des fondations car les fluctuations du niveau piézométrique autour du niveau d'assise sont parfois plus préjudiciables que la remontée elle-même. Ceci met bien en évidence l'intérêt d'une auscultation régulière et suivie du niveau de la nappe avant, pendant et après la construction.

Ville de Paris rive droite

Exemples des conséquences des remontées de la nappe en sous-sol



Figure 8 a - Venues d'eau au-dessus de la salle de chauffage d'un immeuble



Figure 8 b - Parking sous la place de La Madeleine



Figure 8 c - Parking dans le haut de l'avenue de Neuilly : drains de décharge de la nappe et traces de ruissellement laissant apprécier l'ampleur du phénomène

● Pollution chimique liée aux remontées de nappes

Sous les zones industrielles (pétrochimie notamment), les pompages importants créent des cônes de rabattement de la surface de la nappe où se piège une partie des pollutions, inhérentes à ces industries ou accidentelles, et tout particulièrement les hydrocarbures légers et non miscibles. Lors de l'arrêt ou du ralentissement d'un prélèvement, le nuage de polluants n'étant plus fixé par le cône de rabattement, va alors, tout en s'étendant, s'écouler suivant le gradient de la nappe (fig. 9) avec pour conséquences fréquentes la pollution d'éventuels captages à l'aval hydrauliques ou la pollution des rivières qui constituent l'ultime point bas du système hydraulique.

Une solution consiste à interposer, entre le point de pollution et le secteur à protéger (captages), un dispositif de dépollution comprenant un forage d'exploitation destiné à prélever l'eau polluée, une unité de traitement et un forage de réinjection de l'eau traitée. Un tel dispositif est employé de longue date sur la base aérienne de Strasbourg-Entzheim pour protéger les captages voisins contre la migration d'hydrocarbures infiltrés dans le sol.

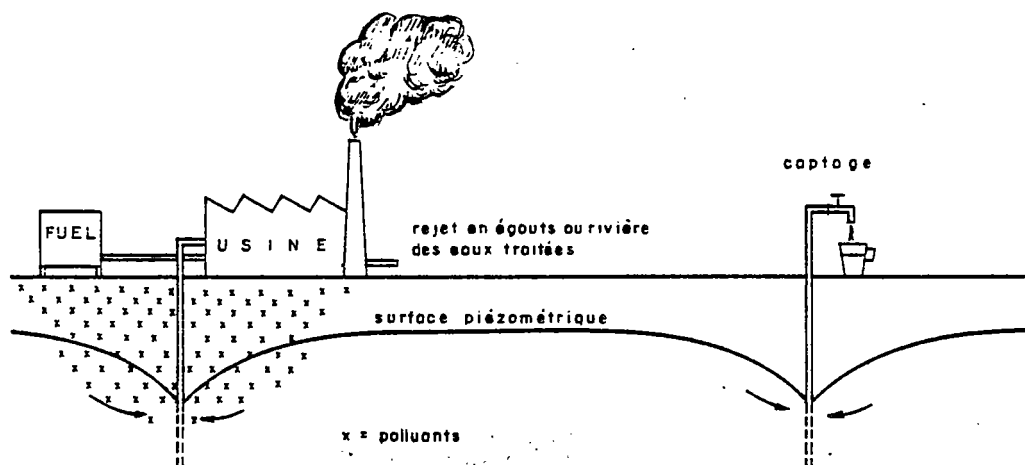


Figure 9 a - Piégeage des polluants dans le cône de rabattement

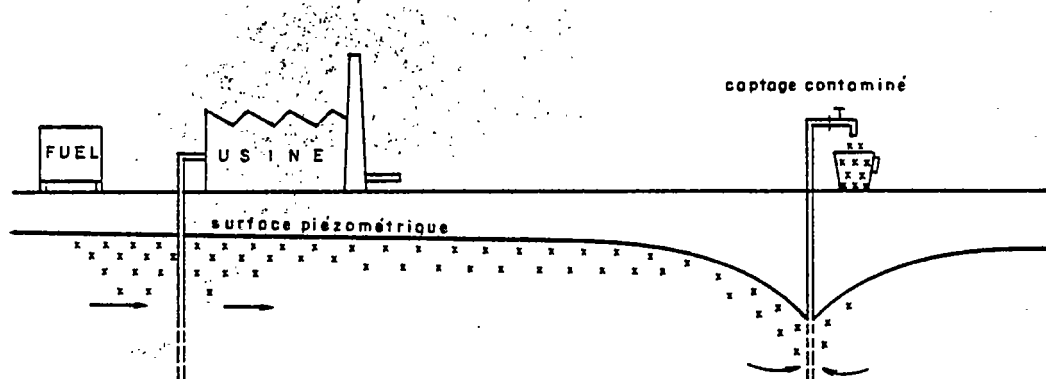


Figure 9 b - Piégeage ou migration d'une pollution après arrêt de pompage sous une zone industrielle

2 - Les remontées de nappe liées aux aménagements

Qu'ils soient de surface ou souterrains, les aménagements peuvent occasionner une remontée de la nappe qui sera d'autant plus dommageable que la surface piézométrique sera peu profonde. On distingue deux types d'aménagement :

- les aménagements hydrauliques (barrages, canaux)
- les aménagements d'infrastructure urbaine.

■ LES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES

Tout aménagement hydraulique entraîne une intervention sur le milieu naturel en particulier lors de la mise en eau des ouvrages.

☆ - Exemple d'une retenue par endiguement

A la mise en eau du barrage, l'élévation du niveau de l'eau provoque des surpressions sur la plus grande partie de la nappe. Ces surpressions peuvent être la cause de débits verticaux à travers les formations superficielles et entraîner une inondation partielle des terrains avoisinant les levées (fig. 10).

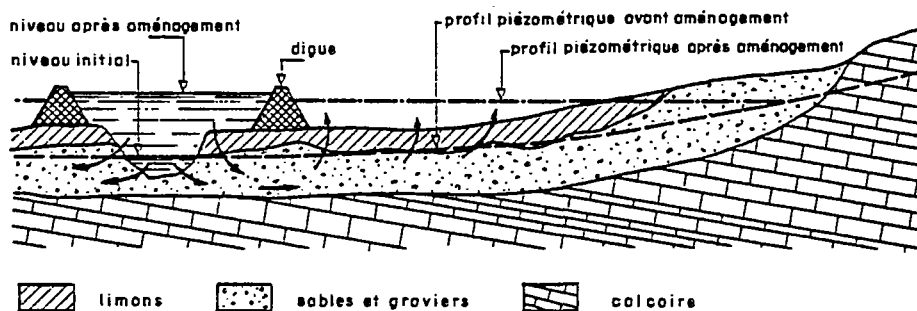


Figure 10 - Remontée du niveau piézométrique à la suite de la création d'une retenue

☆ - Exemple du canal de la Deule à Aubry (Nord)

Le canal de la Deule a été l'objet d'un dragage portant le tirant d'eau de 3,5 à 4,2 m, autrement dit, abaissant le fond du canal de la cote + 17,4 à la cote 16,7 NGF. Le substratum est représenté par la Craie sur laquelle repose la formation dite de l'"argile de Louvil", au faciès sablo-argileux, mais suffisamment argileux pour être parfaitement imperméable. Avant le curage, le canal se trouvait dans la formation imperméable. Après dragage, on remarque que le fond du canal recoupe la craie en certains endroits. Celle-ci draguée, très perméable,

a alors drainé les eaux du canal, provoquant une remontée de la nappe particulièrement importante sous le canal, au droit de la zone de la Craie décapée par la drague. Des inondations de rues situées à une cote inférieure au niveau de la navigation du canal (+ 20,09 NGF) ont été les conséquences de cette remontée de nappe par recharge aussi artificielle qu'involontaire. L'exécution de quelques piézomètres a permis de localiser la zone d'infiltration principale qui pourrait être colmatée au moyen de feuilles de plastique ou d'un déversement de ciment sous l'eau.

■ LES TRAVAUX SOUTERRAINS

De même que les aménagements hydrauliques, les travaux souterrains, de plus en plus denses et importants en zone urbaine, modifient fréquemment les conditions hydrogéologiques. Nous avons déjà évoqué les conséquences des pompages et arrêts de pompage nécessaires à la réalisation hors d'eau de ces travaux (RER, parkings souterrains, métropolitains pour Paris et les grandes villes françaises). On insistera plus ici sur l'effet des ouvrages eux-mêmes vis-à-vis des nappes souterraines peu profondes. On conçoit aisément que la construction d'édifices baignant dans une nappe souterraine, dont on a parfois tendance à oublier qu'elle s'écoule, provoque une modification de la circulation de l'eau. Lorsqu'on a affaire dans un même secteur à la juxtaposition de telles constructions (immeubles, parkings, tubes de métro), un véritable barrage hydraulique partiel peut apparaître. Comme son nom l'indique, il va s'opposer à l'écoulement normal de la nappe. La principale conséquence de ce barrage sera la remontée de la nappe à l'amont et une baisse à l'aval, amont et aval étant défini par rapport au sens de l'écoulement souterrain. Cette remontée peut éventuellement être cause de désordres (inondations), en particulier lorsque les conditions topographiques s'y prêtent.

3 - Les remontées de nappe liées à des activités diverses

On distinguera parmi ces remontées de nappe les cas liés à des travaux d'extraction de matériaux dans le milieu alluvial, ceux liés à des infiltrations ou réinjections depuis la surface et ceux liés à des affaissements de terrain.

■ LES EXTRACTIONS DE MATERIAUX : CAS DES BORDS DE LOIRE EN AVAL DE SAUMUR (MAINE-ET-LOIRE)

Les alluvions récentes de la Loire occupent toute la partie du val d'Authion comprise entre le fleuve et son affluent. Elles sont représentées de bas en haut par :

- un horizon de sable grossier avec très souvent à la base une couche de galets,
- une couche d'argile semi-perméable : "la jalle" contenant toujours du sable. En général, le fond du lit de la Loire repose sur ou dans cette couche. Localement, elle peut cependant être absente,
- un horizon de sables argileux hétérogènes.

On trouve ainsi, superposées, une nappe inférieure semi-captive et une nappe supérieure libre, toutes deux se confondant à une certaine distance de la Loire, sauf lors des crues du fleuve. A proximité des levées de protection, dans la frange d'influence de la Loire (200 à 400 m), la nappe des alluvions inférieures présente un artésianisme dont l'importance est fonction de la puissance de la couche semi-perméable. L'exploitation intensive des graviers de base dans le lit de la Loire entraîne l'extraction des argiles. La suppression de cette couche semi-perméable occasionne une remontée de la nappe semi-captive et une augmentation des débits de résurgence en pied de levées. La nappe des alluvions supérieures étant saturée, les eaux s'écoulent vers les zones basses en amplifiant les effets des inondations d'hiver. Ces remontées, dues par endroits à la suppression de la couche d'argile à la suite de l'exploitation des graviers des alluvions inférieures, posent également le problème de la stabilité des levées de la Loire en introduisant potentiellement des phénomènes de "soufflures" et de renards (fig. 11).

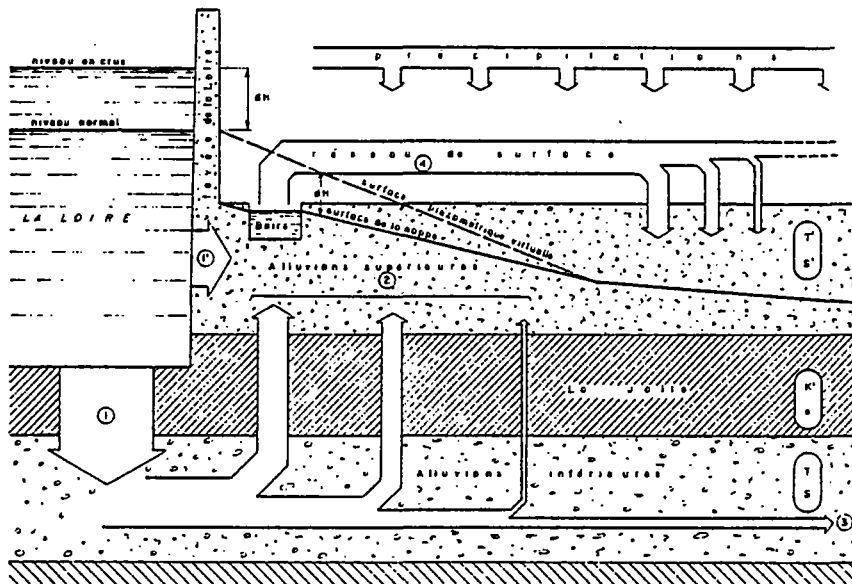


Figure 11 - Schéma des relations nappe-rivière en période de hautes eaux de la Loire (d'après H. TALBO, 1971)

■ LES INFILTRATIONS ET REINJECTIONS

Les infiltrations d'eau et les réinjections concourent aux remontées de nappe. Les infiltrations se produisent en particulier dans certaines zones d'irrigation. Elles existent aussi sous les bassins de réinjection d'eau industrielle.

☆. Exemple des inondations de Raphèle-Moulès (Arles)

Suite à l'irrigation intensive par épandage, des problèmes d'assainissement des zones basses régulièrement inondées se sont posés dans les environs de Raphèle-Moulès. La superficie sinistrée et rendue impropre à la culture était

de l'ordre de 200 ha. Deux raisons ont été invoquées pour expliquer ces inondations. Il s'agit :

- du rôle majeur joué par les irrigations dans l'alimentation de la nappe ; 30 à 40 % du module moyen d'irrigation s'infiltré (4 à 5 mm/j) d'avril à septembre et, de ce fait, entraîne la remontée de la nappe dite des "cailloutis villafranchiens",
- du système de drainage insuffisant ou mal entretenu qui ne permet pas une évacuation aisée des eaux. Les collecteurs sont insuffisamment profonds ou comportent un bourrelet sur leurs berges qui gêne ou empêche l'écoulement de l'eau.

Ainsi, en été, la nappe reçoit davantage d'eau qu'elle ne peut en évacuer sous sa charge maximale et déborde. Deux dispositifs d'assainissement ont été proposés : l'un est constitué par un système de drains horizontaux, l'autre par un réseau de forages.

☆ . Exemple d'infiltrations dans une commune de la Somme

Des usines agro-alimentaires sont contraintes à rejeter des quantités importantes d'eaux usées (1000 à 1200 m³/h). Les rejets se font par infiltration vers la Craie, depuis des bassins artificiels. Outre l'impact chimique des infiltrations, on a étudié leur impact hydrodynamique sur la nappe de la Craie. Ces bassins sont installés dans une vallée sèche qui rejoint celle de la Somme. Ils s'étendent sur 0,45 km² sous forme d'un chapelet de 3,2 km de long comprenant six plans d'eau. Un marais occupe la partie aval du vallon. La confrontation des relevés piézométriques régionaux et des observations effectuées sur le bassin hydrogéologique situé sous le vallon, démontrent clairement que les bassins d'infiltration des eaux usées de la Conserverie participent à l'alimentation de la nappe de la Craie. En été, les apports, particulièrement importants provoquent un gonflement local de la surface piézométrique de la nappe et ce "bulbe" se propage vers l'aval en perdant progressivement de son importance. Depuis 1968, un relèvement de 1,75 m en période de basses eaux annuelles a été constaté à l'aval immédiat des bassins. Selon la pluviosité en période sèche, la remontée supplémentaire annuelle, limitée à quelques mois, peut atteindre de 1,5 à 3 m. Sur une année humide, elle varie entre 0,7 et 2,3 m. Elle est encore plus sensible et entretenue lorsque plusieurs années humides se succèdent, comme c'est le cas depuis 1979. Plus à l'aval, ces valeurs décroissent progressivement jusqu'au niveau de base imposé par les sources du Marais.

La persistance d'un niveau soutenu de la nappe de la Craie maintient saturée la base des limons sus-jacents. Les précipitations efficaces qui pénètrent dans la tranche limoneuse supérieure ne parviennent pas à migrer en profondeur si bien que le ressuyage des terres ne se fait pas pendant plusieurs mois de l'année. Le passage des engins agricoles devient alors impossible et les cultures difficiles. Pour remédier à cet état de fait, deux actions ont été proposées en intervenant :

- soit sur les eaux de la Craie, en provoquant un rabattement de la surface piézométrique par tranchées drainantes au niveau du toit de la roche,

- soit sur les eaux contenues dans les limons en "tissant" un réseau de drains superficiels.

■ "REMONTEE" RELATIVE DE NAPPE LIEE A DES AFFAISSEMENTS DE TERRAIN

Les "remontées" relatives de nappe peuvent avoir une origine naturelle : dissolution de terrains salifères évoquée précédemment, ou artificielle en particulier en région minière où l'affaissement des terrains est lié principalement au foudroyage des anciens travaux.

☆. Dans une mine de la région du Nord, les tensions dans les terrains risquent d'entraîner des affaissements du sol à la verticale de l'exploitation. Toute l'aire concernée est surmontée d'une zone alluvionnaire basse et déjà partiellement affaissée qui contient une nappe alluviale peu profonde.

Ces alluvions reposent tantôt directement sur la Craie du Séno-Turonien (Crétacé), tantôt sur les sables et argiles du Landénien (base du Tertiaire), situés eux-mêmes sur la Craie. La Craie, à son tour contient une nappe d'eau en charge et localement artésienne sous les terrains de couverture. Cette zone affaissée tendant à s'inonder, les Houillères, assurent déjà un relevage des eaux d'une rivière et des eaux qui ruissellent vers la zone noyée afin d'entretenir leur écoulement. Mais il est prévisible que l'affaissement supplémentaire du sol, qui est attendu, va aggraver cette situation.

Une première proposition a été formulée et consiste à déprimer la nappe profonde (de la Craie) qui agira sur la nappe superficielle en la faisant baisser, dans le but de dénoyer les terrains. Un second moyen consisterait à établir un réseau de drainage afin de ne rabattre que la première nappe. Ce choix est apparemment simple et tend à faire préférer la deuxième solution en raison de la relative modicité des installations nécessaires et des débits à mobiliser. Mais pourquoi ne pas valoriser l'opération de pompage en utilisant l'eau si sa qualité le permet ? Et dès lors le choix se pose en termes différents, car il a été reconnu que l'eau de la nappe des alluvions est de mauvaise qualité, difficile à protéger ; ce nouvel élément "économique" introduit revalorise la première solution.

☆. A Montmorot, dans le bassin de Lons-le-Saunier (Jura), des phénomènes d'affaissement naturel du sol étaient connus avant l'apparition des premières exploitations du sel. L'exploitation, par injection d'eau, dissolution du sel dans le gisement et récupération de la saumure, a accéléré ces mouvements, les plus importants se produisant au droit des puits d'extraction avec des vitesses moyennes pouvant atteindre 45 mm/an (fig. 12).

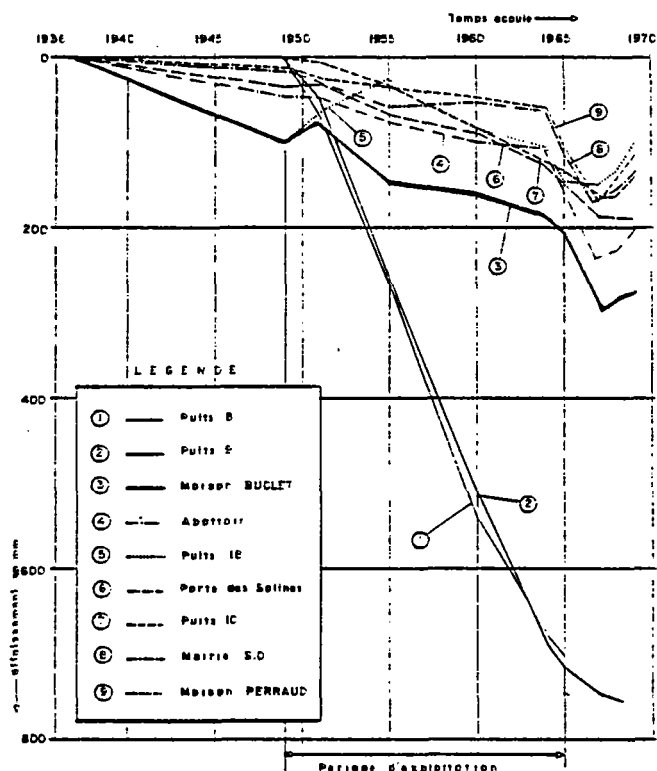


Figure 12 - Mouvements liés à la dissolution du sel dans le Jura. Evolution des tassements dans le temps

A ce rythme, les affaissements peuvent, en l'espace de quelques générations, faire passer la surface topographique en dessous de la surface libre d'une nappe superficielle si celle-ci est sous-tendue par des conditions aval stables et entraîner des inondations, d'abord occasionnelles puis devenant de plus en plus fréquentes.

4 - Multiplicité des conséquences liées aux remontées de nappes

Tous les exemples présentés, bonne énumération des causes les plus fréquentes de remontée de nappe, n'ont pas pour autant permis de saisir toutes les conséquences qui pouvaient en résulter. Leur diversité n'a d'égale que celle de l'utilisation du sous-sol. Ce sont d'ailleurs souvent les aménagements qui les accompagnent qui subissent les dommages d'une remontée de nappe. Quelques exemples brièvement rapportés illustreront cette multiplicité de conséquences, déjà observées ou susceptibles de survenir.

■ REMONTEE DE NAPPE SOUS UNE ANCIENNE DECHARGE

La mise en eau de composés fermentescibles, existant dans un milieu favorable à une activité réductrice, provoque l'émanation de biogaz qui fait naître sinon un risque du moins une nuisance, dans une zone de lotissement. Dans le cas de Lambersart (Nord), la mise en eau est consécutive à l'arrêt d'un rabattement de nappe qui était lié à l'exploitation de limons pour une briqueterie.

■ REMONTEE DE NAPPE SOUS UN CIMETIERE

En période de hautes eaux, le niveau de la nappe alluviale sous le cimetière sub-urbain de Cornebarrieu, pour la ville de Toulouse, était très proche de la surface du sol et gênait considérablement l'exploitation du cimetière pour des raisons d'hygiène. La remontée de la nappe était consécutive aux variations saisonnières mais il s'y ajoutait les effets du rejet des eaux usées dans des puisards proches, rejet qui contribuait aussi aux gonflements de la surface piézométrique. Pour remédier à cette situation, un dispositif de drainage a été mis en place.

■ REMONTEE DE NAPPE PAR COMPLEMENT DE TRANCHEE

Le creusement d'une tranchée de chemin de fer, près d'Angers, au siècle dernier, a eu pour effet de diminuer localement l'épaisseur de la formation imperméable qui recouvrait la nappe. Dès lors, la tranchée a joué le rôle d'un drain et a rabattu la nappe dans la zone environnante. Le comblement de la tranchée en 1976, sans maintien du drainage, a rétabli l'état piézométrique initial, entraînant des venues d'eau dans les parties basses des habitations qui avaient été construites avant 1976 à proximité.

■ REMONTEE DE NAPPE DUE A LA CREATION D'OUVRAGES POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE (AEP)

Les arrêts de pompages pour alimentation en eau potable engendrent fréquemment des désordres dans "l'urbanisme souterrain". Mais la réalisation d'installations collectives d'AEP peut également provoquer des remontées de nappe par l'abandon consécutif d'une multitude de points de prélèvements privés. Ce cas, dû au passage du service individuel au Service Public, est fréquent dans le Massif armoricain où l'alimentation en eau de nombreux villages était assurée par des puits exploitant des nappes perchées. Le raccordement de ces villages à un réseau de distribution a entraîné l'arrêt des prélèvements individuels provoquant la remontée du niveau de ces nappes, certainement amplifiée par l'augmentation des rejets d'eaux usées.

■ REMONTEE DE NAPPE SOUS DES CUVES OU DES CANALISATIONS ENTERREES

Lors des remontées de nappes peu profondes, consécutives à des phénomènes naturels ou artificiels, les canalisations de grands diamètres enterrées peuvent être entièrement ou partiellement ennoyées, subissant ainsi de la part des eaux la poussée d'Archimède. Si, à la mise en place, elles n'ont pas été lestées et recouvertes d'un remblai exerçant un moment résistant, la rupture des conduites peut survenir et entraîner la pollution des nappes.

Pour les citernes enterrées, la répercussion d'une remontée est analogue : l'apparition des désordres sera d'autant plus rapide que les remontées de nappe coïncident avec un allègement des cuves, dû à la vidange progressive de leur contenu.

Sur un réseau de conduits enterrés servant à véhiculer à chaud les hydrocarbures lourds, on a observé que, par la remontée de la nappe, l'eau venait baigner une conduite, la refroidissait et faisait passer les hydrocarbures de l'état fluide à l'état pâteux, ce qui entraînait un colmatage et l'arrêt du transport.

Mais, inopérant ou actif, le réseau est alors soumis à la corrosion par l'eau, surtout dans la zone de battement oxygénée qui se trouve au niveau de la surface de la nappe ; la destruction du réseau s'accompagne d'un départ de pollution. De tels cas sont observés actuellement.

■ REMONTEE DE NAPPE PAR CONCOMITANCE DE PHENOMENES NATURELS

La conjugaison de phénomènes naturels tels que l'arrivée dans un estuaire d'une crue et d'une forte marée peut entraîner une remontée piézométrique temporaire, occasionnant des venues d'eau dans des sous-sols qui étaient généralement à l'abri des influences de l'une ou l'autre de ces perturbations lorsqu'elles surviennent séparément.

■ REMONTEE DE NAPPE PAR INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES COLLECTEES

Le procédé d'évacuation des eaux pluviales par puits filtrants constitue un véritable processus d'auto-ennoyage.

On observe couramment, dans la zone méditerranéenne, des débits de pointe d'orage, collectés sur des lotissements, des zones industrielles ou commerciales, de l'ordre du mètre cube par seconde. Les terrains calcaires sont très fréquents dans ces régions. Aussi la tentation est grande, lorsque ces eaux ont été collectées, de les rejeter dans un orifice karstique, en particulier si le réseau d'assainissement existant s'avère insuffisant. Dans le meilleur des cas, ces eaux gagnent la zone noyée du karst où elles provoquent une mise en charge temporaire supplémentaire, et modérée, compte tenu

de la dimension généralement importante des conduits naturels. Elles s'évacuent par le, ou les exutoires naturels du réseau souterrain après amortissement sensible de l'onde de crue souterraine et sans autre effet notable qu'un débit de pointe renforcé des résurgences.

Mais cette onde de crue, anormalement forte, peut également toucher des zones indépendantes du karst noyé, activer des émergences situées sur des réseaux fossiles et entraîner l'ennoyage temporaire de zones plus ou moins vastes, où habituellement l'eau n'apparaît pas aussi brusquement et avec de tels débits (fig. 13).

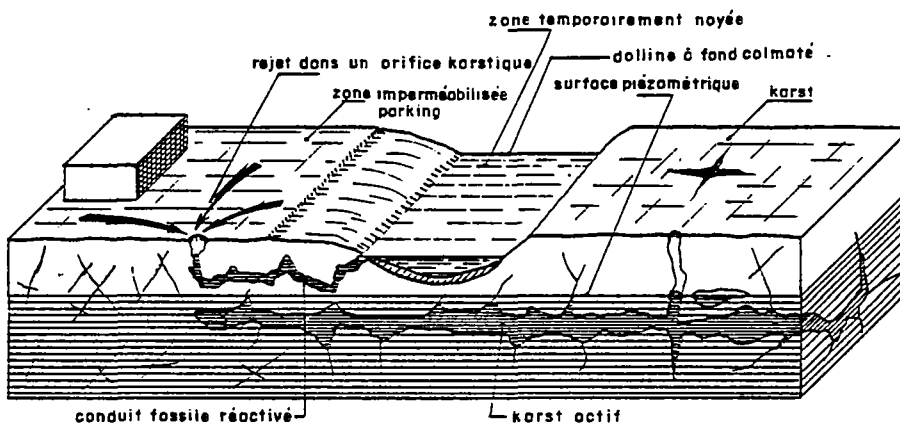


Figure 13 - Ennoyage de zone basse en milieu karstique par réactivation de conduit "fossile"

Deuxième partie

**REMEDES
ET
PREVENTION**

Les exemples rapportés montrent que dans la majorité des cas, techniciens et ingénieurs de l'eau et du sous-sol ont été amenés à intervenir alors que le phénomène de remontée de nappes était en cours, c'est-à-dire en pleine "pathologie". Il leur était demandé alors de proposer des solutions palliatives ou curatives pour remédier aux nuisances ou aux désordres apparus.

Les remèdes appliqués à la protection du milieu naturel au sens propre, des ouvrages souterrains et des ouvrages de surface contre les effets des remontées de nappes peuvent être classés en deux catégories :

- interventions directes sur la nappe provoquant un rabattement par les techniques classiques du pompage et du drainage. On les qualifiera de remèdes actifs,

- interventions non sur la nappe, mais directement sur les constructions souterraines que l'on dotera d'un cuvelage étanche, d'un radier drainant, d'un ancrage, etc... On les qualifiera dans ce cas de remèdes passifs .

Les différentes solutions s'avèrent souvent difficiles et de mise en oeuvre onéreuses en raison précisément de leur application tardive. Ce caractère tardif peut se justifier dans certains cas lorsque la remontée est exceptionnelle et "imprévisible". Mais généralement ces cas sont le résultat d'un manque d'informations sur le sous-sol, lacune qui n'a pas permis de prendre les dispositions utiles contre les dommages d'une éventuelle remontée de nappe.

I - Les remèdes

1 - Les remèdes "actifs"

Ils consistent à abaisser le niveau de la nappe au moyen d'ouvrages de captage. En fonction du mode d'exhaure, les ouvrages de captage peuvent être classés en deux groupes :

- puits et forages avec exhaure par pompage,
- drains et galeries avec exhaure par écoulement gravitaire.

Le rôle de ces différents équipements est de créer un abaissement de la surface de la nappe.

. Dans le cas de drains, on observe un rabattement concave vers le bas et symétrique par rapport au plan axial vertical du conduit (en terrain homogène) (fig. 14).

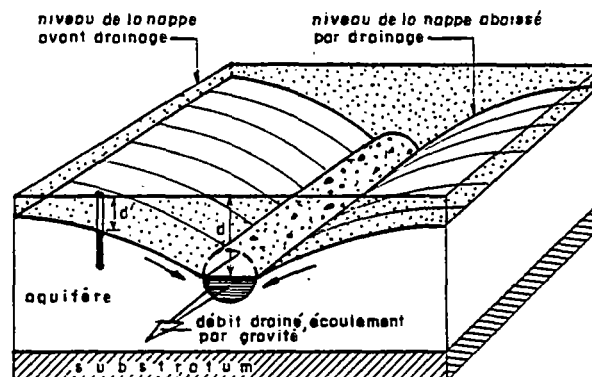


Figure 14 - Rabattement par drainage

d = baisse de niveau à la verticale du drain

d' = baisse du niveau observée en un point donné par un piézomètre

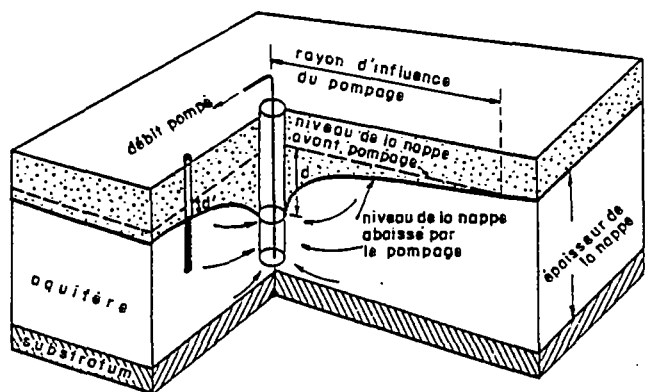
. Dans le cas de pompage par puits ou forage, la nappe, initialement horizontale, se creuse en forme de trompe. Le rayon d'influence du pompage correspond au rayon maximal du cône de rabattement et dépend de la dénivellation dans le captage, provoquée par le débit prélevé, de la perméabilité et de l'épaisseur de l'aquifère (fig. 15).

Une perméabilité élevée engendrera une aire d'influence très étendue mais une amplitude de rabattement faible ; inversement, une perméabilité faible conduira à un rayon d'influence petit mais à un rabattement important, en régime de quasi-équilibre.

■ LES RABATTEMENTS PAR POMPAGE

. Le dénoyage par pompage en puits ou forages est possible dans tous les cas de figure. Cette technique est cependant particulièrement bien adaptée pour rabattre ponctuellement une nappe ou pour provoquer localement un fort rabattement. Elle est aussi indiquée lorsque la nappe est profonde sous la surface du sol (à plus de 5 m), même si elle amène parfois à rencontrer certaines difficultés et nécessite des équipements de forages spéciaux (sables fins "boulants", ...).

. Si la zone à dénoyer est vaste ou si la réalisation d'un forage pose des problèmes techniques (sous une construction souterraine par exemple), la mise en service de plusieurs forages fonctionnant en batterie, et dont les débits et la disposition seront définis après réalisation et exploitation d'un modèle de simulation, peut être envisagée (fig. 16).



d = baisse de niveau dans le puits
 d' = baisse de niveau observé en un point donné par un piézomètre
 ← direction et sens d'écoulement dans la nappe déterminé par pompage

Figure 15 - Rabattement par pompage (d'après J. MARGAT)

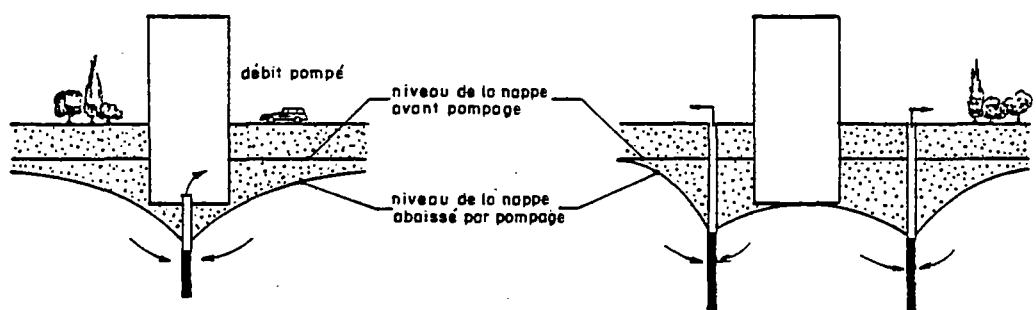


Figure 16 - Rabattement par pompage sous des constructions souterraines

■ LES RABATTEMENTS PAR DRAINAGE

Le dispositif de drainage est souvent mis en place lorsqu'une nappe affleurante ou subaffleurante doit être abaissée pour assainir les sols ou pour lutter contre des inondations périodiques de surface. C'est donc un procédé généralement appliqué à des nappes peu profondes sous la surface du sol pour obtenir, sur une aire plus ou moins étendue, un rabattement de faible amplitude. La réalisation d'un tel dispositif, constitué d'un réseau de drains dont la profondeur et la géométrie sont déterminées par simulation de rabattement à l'aide d'un modèle numérique, reste conditionnée par les caractéristiques topographiques locales. En effet, le fonctionnement par gravité du système impose aux collecteurs d'évacuation des eaux une pente minimale et par conséquent une longueur pouvant dépasser une limite raisonnablement admissible.

Pour pallier les inondations de Nibas (Somme) qui proviennent, rappelons-le, d'un phénomène naturel de remontée de la nappe d'eau souterraine au-dessus du niveau du sol, dans le vallon qui traverse le village, le BRGM a proposé, après études, la réalisation d'un ouvrage de drainage constitué d'une tranchée suivant l'axe du vallon à 4 m de profondeur sous le niveau de la route. Ce drain central sera rempli successivement de "tout-venant" grossier, de limon compacté et étanche et enfin de remblai. Sa longueur totale sera de 420 m. Au niveau de l'axe drainant, un rabattement de l'ordre de 7 m par rapport à la cote maximale de l'aquifère correspondra à un débit drainé par gravité qui atteindra de 500 m³/h et qui permettra le dénoyage des caves.

La technique du rabattement par drainage est classiquement utilisée pour les remontées de nappes alluviales consécutives, soit à la création d'un plan d'eau surélevé, soit à la mise en eau de canaux. Dans ce cas, on réalise des tranchées drainantes en pied de levée de remblai ou en bordure de canal. Leur activité dépendra du degré de colmatage du canal, autrement dit de son âge et de la fréquence des curages (fig. 17).

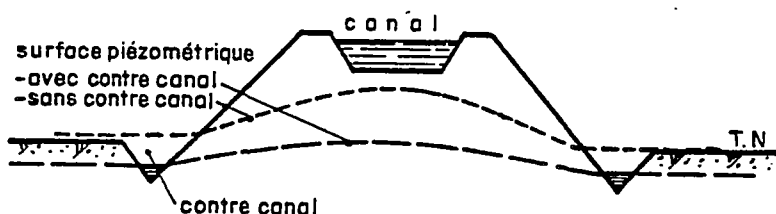


Figure 17 - Rôle des tranchées drainantes latérales

■ LES RABATTEMENTS PAR DISPOSITIF MIXTE

Lorsque des constructions pénètrent profondément dans la nappe et si la topographie interdit toute évacuation des eaux par écoulement gravitaire, la technique du rabattement par drainage ne peut être employée seule. Il convient de lui associer une station de relevage des eaux recueillies, soit par pompage, soit par récupération depuis l'édifice. Il s'agit donc d'une solution mixte. Le drainage depuis l'édifice peut être réalisé par les parois des bâtiments munies de barbacanes, un puits collecteur équipé d'une pompe assurant le relevage (fig. 18). Un radier drainant peut aussi provoquer le rabattement recherché (fig. 19).

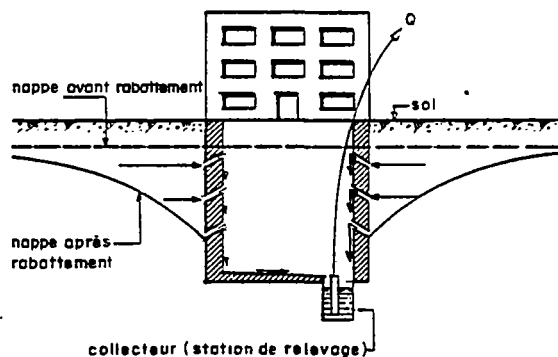


Figure 18 - Drainage par parois à barbacanes

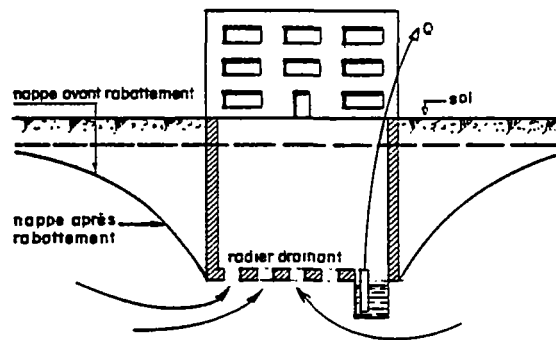


Figure 19 - Drainage par radier filtrant

■ LE CHOIX DU DISPOSITIF DE RABATTEMENT

Hormis les conditions techniques que nous venons d'évoquer et qui conduisent à choisir tel ou tel dispositif de rabattement, d'autres considérations, en particulier d'ordre financier, peuvent influencer sur la décision finale. En effet la réalisation d'un système de drainage représente un investissement important au départ. C'est pourquoi de nombreux responsables (collectivités locales ou particuliers) préfèrent s'accomoder du désordre ou de la nuisance même si à long terme les dommages conduisent à un coût d'entretien beaucoup plus élevé, plutôt que de réaliser un dispositif approprié.

Par contre, l'alternative du rabattement par puits et pompage exige un investissement moins important au départ, mais présente tout de même l'inconvénient d'un coût de fonctionnement beaucoup plus élevé (entretien du moteur, consommation d'énergie, etc.). A priori, cette dernière solution est préférable dans les cas où le temps moyen de fonctionnement du dispositif est court, les frais d'entretien étant réduits en conséquence. Par contre, si le dispositif est destiné à fonctionner en permanence, la méthode du drainage paraît plus indiquée, sa maintenance étant peu coûteuse. Quoiqu'il en soit, le prix de revient de ces travaux reste élevé et souvent difficilement supportable pour un particulier, voire une collectivité locale, en regard des avantages qui en résultent*. Pour rentabiliser l'intervention à long terme, il faut envisager par quels moyens on peut valoriser l'eau pompée ou drainée. Ceci nécessite donc qu'on ne considère plus l'eau sous son aspect nuisance mais bien comme une ressource qu'elle ne cesse d'être même lorsqu'elle est à l'origine de désordres.

● Les possibilités de valorisation permettant de minorer le prix de revient des installations sont diverses. La plus simple d'entre elles consiste à utiliser l'eau, pour l'alimentation si elle est potable sinon pour l'industrie, en particulier en milieu urbain. L'utilisation de l'eau pour le fonctionnement des pompes à chaleur (PAC) peut être une solution envisageable au niveau d'une collectivité locale, les besoins énergétiques étant a priori plus importants en saison des hautes eaux, c'est-à-dire en période de remontée de nappe (hiver, printemps). Cependant cette solution se heurte au problème du rejet des eaux qui ne doivent pas, dans le cas présent retourner à la nappe par réinjection sur place ce qui annulerait l'effet de "rabattement" recherché. Il reste donc les possibilités de rejet dans un réseau de surface (rivière etc.) ou dans un réseau d'assainissement.

● Le rejet dans un réseau séparatif d'assainissement ne pourra se faire que s'il existe un réseau d'évacuation eaux usées - eaux pluviales et le rejet se fera dans le réseau pluvial. Il convient cependant de signaler que le rejet dans un réseau séparatif pluvial d'eau utilisée par une PAC n'a pas été envisagé par le législateur. On peut concevoir que ces rejets soient autorisés sans prélèvement d'une taxe, dans la mesure où ils contribuent à lutter de façon rentable contre les dommages ou nuisances de la remontée. Cette mesure d'exonération serait incitatrice à l'installation de PAC et, indirectement, permettrait de résoudre à moindres frais des problèmes qui sont souvent à la charge de la collectivité.

Si l'installation de PAC n'est pas envisageable, d'autres usages publics ou industriels de l'eau pompée ou drainée sont possibles tel que l'arrosage des jardins, le nettoyage des chaussées, l'alimentation des fontaines, la réfrigération, ... De ce fait les rejets dans le réseau pluvial seraient possibles et

* A titre d'exemple, le montant du devis concernant le dispositif de drainage de la commune de Nibas, qui permettrait de dénoyer en tout temps les caves, s'élève à 5,6 MF h.t.. La solution partielle qui consisterait à ne rabattre que de 1 m sous la route atteint 4 MF h.t..

non assujettis à la redevance. Il est évident que la plupart des solutions proposées pour valoriser l'eau extraite afin de rabattre les nappes sont surtout applicables en zone urbaine où les besoins en eau sont importants.

2 - Les remèdes "passifs"

Pour des raisons techniques ou financières, il arrive que la solution du rabattement par pompage ou drainage ne convienne pas, même dans le cas où des édifices souterrains sont soumis aux effets de la remontée de la nappe. La protection des ouvrages passe alors par une reprise en sous-oeuvre des bâtiments conçus pour être hors d'eau afin de les doter des équipements indispensables qui éviteront les nuisances et les désordres occasionnés habituellement par ce phénomène. L'intervention ne se fait plus sur la nappe mais sur l'infrastructure du bâtiment. En général, les désordres observés dans de telles situations se manifestent le plus souvent par des inondations et posent donc des questions d'étanchéité et de flottabilité, donc de stabilité.

Dans le premier cas, le remède consiste à réaliser un cuvelage étanche des sous-sols submergés. Cette opération s'avère toujours très onéreuse en raison des difficultés d'intervention propres au travail en sous-oeuvre. Son coût est considérable en regard de celui de l'étude hydrogéologique préventive qui aurait permis, à partir des historiques piézométriques et d'un modèle, de fixer la hauteur du cuvelage à réaliser en cours de construction du bâtiment et dont le prix dans ce cas restait raisonnable et compatible avec les avantages qu'on pouvait en attendre.

Aux problèmes d'inondation s'ajoutent ceux de la stabilité des ouvrages soumis à la poussée d'Archimède de plus en plus importante au fur et à mesure de la montée de la nappe. Cette force ascendante peut devenir importante par rapport au poids de l'ouvrage et se traduire par l'apparition de fissures nuisibles à la solidité de l'édifice. Ces doubles problèmes de cohésion et de stabilité sont combattus par les deux techniques suivantes :

LESTAGE ET ANCRAGE

■ Le lestage se fait par l'intermédiaire du radier dont on va augmenter l'épaisseur afin d'alourdir le bâtiment. Toutefois, cette technique ne peut être utilisée que lorsque les sous-pressions à combattre sont faibles, c'est-à-dire inférieurs à 1 t/m^2 (l'épaisseur du radier ne peut être considérablement augmentée).

La technique d'ancrage consiste à solidariser le bâtiment concerné à une masse suffisante de terrain pour que celui-ci joue le rôle de lest. Les techniques utilisées relèvent de la mise en place dans les terrains sous-jacents d'ancrages passifs (boulons scellés) ou d'ancrages précontraints dont les têtes sont solidaires d'un radier armé.

Quelle que soit la solution adoptée pour intervenir sur le milieu naturel et protéger les constructions souterraines contre la remontée, on est confronté aux problèmes financiers des opérations curatives. Le remède représente toujours un coût élevé surtout lorsqu'un bâtiment doit être repris en sous-oeuvre. On constate à l'usage et afin d'éviter des dépenses excessives qu'il est préférable de prévoir le phénomène et prendre les dispositions de protection nécessaire avant que les effets néfastes n'apparaissent et empêchent ou compliquent techniquement les interventions. Il est sans conteste plus avantageux de doter un bâtiment souterrain d'un cuvelage lors de sa construction plutôt que de l'effectuer après sa réalisation. Cette démarche préventive implique d'acquérir une meilleure connaissance du sous-sol et du comportement de la nappe, comportement pouvant être naturel ou influencé. Dans la plupart des cas, l'étude préventive consiste à estimer les variations probables du régime de la nappe mais elle peut aussi revêtir un aspect plus pratique à partir d'actions sur l'environnement, qui émanent du bon sens. Ce sont les divers moyens dont nous disposons pour assurer cette prévention que nous allons examiner maintenant.

II - La prévention

Certes, l'aménageur ou l'hydrogéologue n'aura pas la possibilité de prévoir et de décrire à l'avance toutes les remontées de nappe. Il est évident que certaines remontées auront toujours une origine accidentelle au sens statistique du terme. Celles-ci seront donc imprévisibles.

Par contre il peut intervenir de manière préventive sur bon nombre d'autres cas. Ces actions préventives se classent en deux groupes.

- Le groupe des mesures préventives directes. Elles contribuent effectivement à limiter la remontée de la nappe.

- Le groupe des mesures préventives indirectes dont le but n'est pas de modifier la remontée mais d'estimer et quantifier son évolution dans le temps et dans l'espace. Ce sont des mesures visant à optimiser la protection de l'environnement contre des remontées de nappe artificielles ou naturelles mais visant aussi à concevoir ou adopter les techniques de construction adéquates dans le cadre d'un aménagement du sous-sol. Il s'agit d'études prospectives plus ou moins complexes suivant les facteurs qui sont la cause de la remontée.

Avant d'exposer ces mesures préventives, on insistera sur le fait que la prévention commence par l'information. Si l'ingénieur doit avant toute chose recueillir les données de bases (enregistrements piézométriques, alimentation de la nappe, prélèvements par pompes, etc.), les particuliers ou les responsables de l'aménagement doivent avant tous travaux s'informer sur le sous-sol et la piézométrie en particulier. A cet effet, la Banque des données du sous-sol

gérée par le BRGM dans le cadre de sa mission de Service Public est à leur disposition. Ensuite il est possible d'interroger l'ingénieur hydrogéologue sur l'évolution probable de la surface piézométrique et éventuellement sur l'impact de l'aménagement sur l'environnement. Cette première démarche, simple, permettra d'orienter si nécessaire les études prévisionnelles. S'informer, s'interroger, c'est déjà prévenir.

1 - Les mesures préventives directes

On conçoit facilement que le moyen de limiter la remontée d'une nappe c'est d'intervenir directement sur le facteur principal qui régit le phénomène : la recharge. Précisons de suite que cette intervention ne peut se faire que sur les recharges artificielles par opposition aux recharges naturelles (pluies, rivières, etc.) qu'on ne peut évidemment contrôler. Quelles sont ces recharges artificielles ? La plupart sont accidentelles. La prévention en ce domaine consistera donc à éviter l'"accident". L'alimentation d'une nappe peut être renforcée à la suite de ruptures de canalisations, de réseaux de drainage, d'égouts, des caniveaux défectueux, d'une adduction d'eau percée. Chacun de ces accidents peut paraître à première vue anodin mais dans les zones urbaines on a pu vérifier que leurs effets ne l'étaient pas lorsqu'ils se cumulaient. Ils peuvent représenter localement et dans certains cas près de 50 % de la recharge totale de la nappe. On voit donc l'intérêt qu'il y a à entretenir et à veiller au bon état de tous les réseaux d'évacuation et d'adduction lorsqu'on connaît les dommages que peut engendrer une remontée de nappe intempestive. De plus cette opération d'entretien permet d'éviter la pollution si on a affaire à un réseau d'eaux usées, ou plus simplement des pertes financières, s'il s'agit d'une adduction d'eau.

D'autre part, nous avons examiné dans la première partie l'exemple d'une remontée de nappe liée au curage et à l'approfondissement d'un canal. Il montre que ce type de travaux doit être exécuté en prenant soin de ne pas décolmater le fond du canal ou bien de ne pas mettre à nu un terrain perméable, qui permettrait une recharge et donc une remontée de la nappe occasionnant inondations ou autres nuisances...

En zone urbaine et semi-urbaine, on doit veiller à l'évacuation systématique des eaux pluviales par un réseau d'évacuation. Si ce n'est pas le cas, et compte tenu du grand développement des surfaces imperméabilisées, les eaux du ruissellement s'infiltreront très ponctuellement et ainsi favoriseront localement des remontées dommageables.

Enfin, en milieu rural, on a constaté que des inondations liées à des remontées de nappe pouvaient être accentuées par le colmatage des lits temporaires des rivières et le remplissage des tranchées ou fossés drainants qui de ce fait ne jouent plus leur rôle. Là aussi un entretien simple mais efficace doit permettre de limiter les effets de la remontée de la nappe en atténuant son importance.

Dans l'ensemble, ces mesures dites directes n'ont qu'un domaine d'application restreint. Le développement considérable de l'aménagement et de l'exploitation du sous-sol, le souci de contrôler et de prévoir l'impact pour maîtriser ou réduire le rôle néfaste de la remontée de la nappe, qu'elle soit naturelle ou liée à un aménagement ou une exploitation, ont permis de concevoir et de mettre au point des méthodes d'études. La mise en application des propositions qui résultent de ces études constitue des mesures préventives indirectes dans le sens où elles ne s'appliquent pas aux effets mais aux causes, permettant aux responsables, aux aménageurs, de décider des projets en connaissant l'évolution future de la nappe en fonction des éventuelles interventions qui modifieront son comportement "normal".

2 - Les mesures préventives indirectes

Rappelons que le but de ces méthodes indirectes par prévention n'est pas de s'opposer au phénomène remontée de nappe mais de le contrôler : l'hydrogéologue ne se contente plus d'expliquer des situations observées, il doit prévoir et souvent simuler des états futurs. Toutefois avant d'en arriver à la simulation par utilisation de modèle qui est la partie scientifique de sa démarche, l'hydrogéologue doit se livrer à une première tâche à caractère d'enquête.

■ L'ENQUETE

Dans le cas où une construction individuelle est concernée, l'hydrogéologue peut effectuer cette démarche à la demande d'un particulier (promoteur, architecte...), mais ce dernier est aussi bien en mesure de l'entreprendre personnellement auprès de la Banque des données du sous-sol de chaque Service géologique régional du BRGM et des administrations et organismes compétents. Avant tout aménagement situé dans une zone où la nappe est reconnue peu profonde, il y consultera l'historique piézométrique qui l'intéresse. Les renseignements recueillis permettront de savoir, en fonction du projet, si l'on doit prendre des mesures de protection particulière, si des études plus détaillées doivent être entreprises ou, au contraire, si l'évolution de la nappe est telle (profondeur restant importante en tout temps) que les travaux peuvent être entrepris sans risque de dommages ultérieurs.

C'est également au cours de cette enquête que l'on se renseignera, par exemple, sur :

- les anciennes zones inondées, aujourd'hui asséchées à la suite d'aménagement (pompage) mais qui risquent de redevenir marécageuses si l'arrêt des prélèvements survient,
- les sous-sols du quartier qui ont pu être inondés dans le passé,
- les travaux projetés, réalisés ou en voie d'abandon, dans le voisinage afin de tenir compte de leur répercussion et des nouvelles contraintes qu'ils imposeront. On accordera beaucoup d'importance au recueil de ces infor-

mations car ce sont elles qui détermineront la nécessité ou non d'études prévisionnelles sur la remontée de la nappe pour fixer les mesures de protection.

Si, après cette enquête, rien ne semble devoir modifier de façon radicale la piézométrie alentour, la consultation des observations piézométriques - si elles sont suffisamment longues - suffira pour prédire la remontée maximale de la nappe. Il est souhaitable que ces enregistrements intéressent plusieurs dizaines d'années pour obtenir des résultats statistiques utilisables.

L'exemple de l'enregistrement de la nappe de la Craie (fig. 20) illustre ce propos. Un piézomètre installé entre 1972 et 1974 aurait indiqué des profondeurs du toit de la nappe supérieures à 15 m. Or, on observe sur la totalité de l'enregistrement (1903-1977) que la surface de la nappe s'est fréquemment trouvée à des profondeurs bien moindres (10 à 15 m).

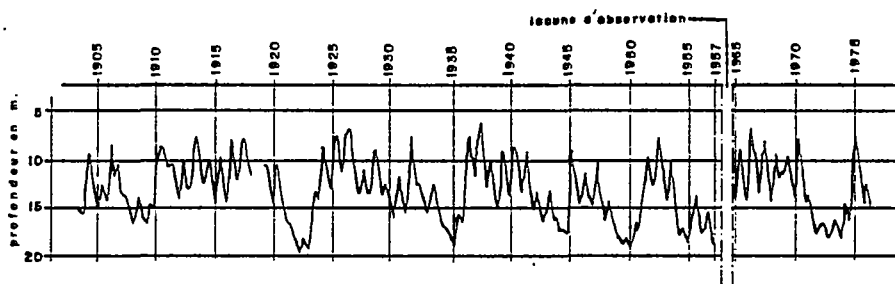


Figure 20 - Tincques (Pas de Calais) 1903-1977 :
Variations piézométriques de la nappe
de la Craie

On s'aperçoit donc que cette démarche simple, même si l'on conçoit qu'il faille parfois beaucoup de perspicacité pour prévoir un arrêt de pompage industriel, permet de prendre les précautions nécessaires soit au niveau de la réalisation, soit à celui des études préventives. De nombreuses mésaventures montrent hélas qu'elle n'est pas toujours suivie. Nous verrons plus loin par quels moyens cette démarche pourrait être facilitée.

Comme on vient de le voir, de longues séries de données piézométriques sont nécessaires pour en tirer des résultats significatifs et fiables. Or il est fréquent que ces données soient trop courtes. En d'autres occasions, et en particulier lors de travaux de génie civil de surface (aménagement hydraulique) ou souterrain, lors d'arrêt de pompage, le comportement futur de la nappe est difficilement prévisible : la prévision par simple consultation des données disponibles est insuffisante et l'on passe alors à une tâche plus spécifiquement hydrogéologique.

■ LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE

La démarche scientifique s'appuie sur différents outils mathématiques ou méthodes de calcul, les principales étant les méthodes de corrélation, les méthodes statistiques et les modèles de simulation.

● Méthodes de corrélation

Les méthodes corrélatives sont utilisées pour restituer une variable, par exemple le niveau d'une nappe en un point, que l'on connaît sur une trop courte période, à partir de la connaissance d'une variable liée à la première (pluie, niveau de la rivière, relevés sur un piézomètre, etc.) et mieux connue car accessible et généralement mesurée depuis plus longtemps. Cette restitution sur plusieurs dizaines d'années retrace l'historique piézométrique qui sera exploité.

L'étude de l'aménagement des sablières de Sierentz (Haut-Rhin) fournit un bon exemple d'étude par corrélation avec des données voisines : le réaménagement agricole et forestier des gravières de Sierentz consistait à remblayer certaines parcelles jusqu'à une cote qui devait se situer au-dessus du niveau des hautes eaux de la nappe, l'événement étant considéré avec une période de retour de 10 ans. Les chroniques piézométriques sur les ouvrages situés à proximité de la gravière ne dépassant pas 2 à 3 ans, des corrélations ont été établies entre ces points et le piézomètre de Habsheim relevé depuis 1947 et dont la situation hydrogéologique est très comparable.

L'étude statistique des niveaux restitués par corrélation a permis de déduire les cotes de la nappe pour une crue décennale sur les points de mesure situés aux abords de la gravière. La cote du remblaiement a ainsi pu être fixée pour que la crue décennale n'inonde pas les nouveaux terrains.

● Utilisation de modèles de simulation

Le recours aux modèles mathématiques de simulation est indispensable pour l'étude prévisionnelle du comportement des nappes soumises à des conditions artificielles (pompage et arrêt de pompage, etc.) ou touchées par des travaux ou aménagements de surface ou souterrains. Le modèle ayant été calé, c'est-à-dire étant le reflet le plus exact possible du système aquifère au voisinage de l'aménagement, est exploité. On y étudie successivement les répercussions des nouvelles conditions ou des aménagements, seuls d'abord puis en leur associant un ou plusieurs dispositifs de protection, que l'on ajuste au mieux. On prévoit donc de façon quantitative l'influence des actions menées ou des réalisations entreprises sur les comportements des nappes. On déduit alors les mesures compensatrices à prendre et les solutions techniques les mieux adaptées aux constructions projetées. On utilise également dans les contextes mal définis des modèles de comportement prenant en compte simultanément et globalement plusieurs sollicitations. Le prix de revient d'une telle étude préventive est sans commune mesure avec les conséquences financières de situations imprévues, d'autant plus fâcheuses qu'il s'y attache un effet de surprise.

☆ - Exemple des arrêts de pompages du Grand Camp à Lyon

Cet exemple, que nous avons déjà présenté en première partie, illustre parfaitement le type d'étude préventive qui doit être réalisé lors d'interventions sur des nappes phréatiques. L'exploitation d'un modèle de simulation a permis de déduire l'amplitude des remontées de la nappe consécutives à l'arrêt des captages du Grand Camp (6 000 à 7 000 m³/h) (fig. 21). De la même façon, les

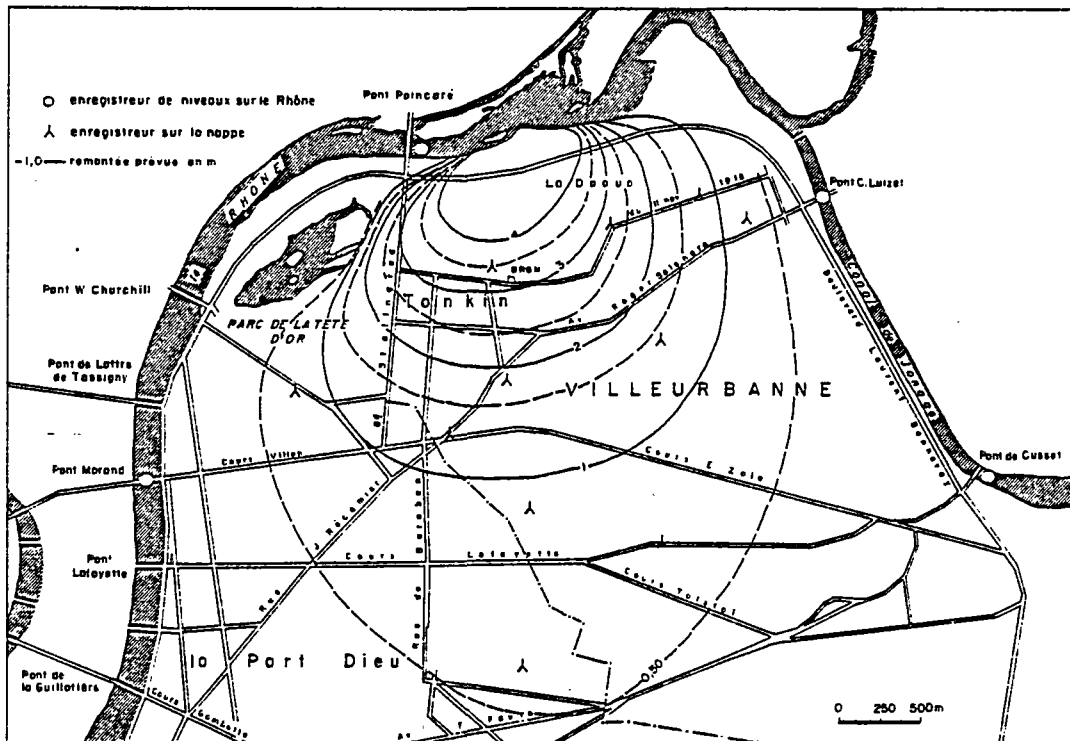


Figure 21 - Ville de Lyon : tracés de remontées prévisibles maximales de la nappe par simulation de l'arrêt des pompages du Grand Camp (d'après D. ROUSSELOT, 1977)

grands projets tels que la rénovation du quartier du Tonkin à Villeurbanne, ou la construction du métro de Lyon, ont été conçus en tenant compte du relèvement futur de la nappe qui avait été prévu par l'emploi d'un modèle mathématique.

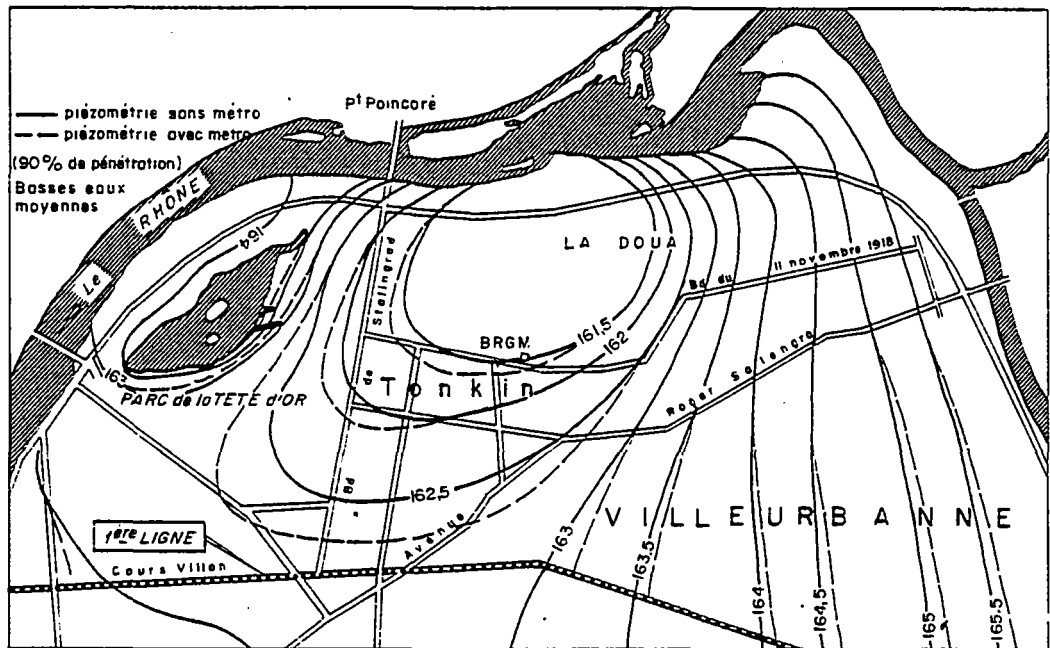


Figure 22 - Ville de Lyon : influence simulée du tube métro
Projet 1970 - première ligne

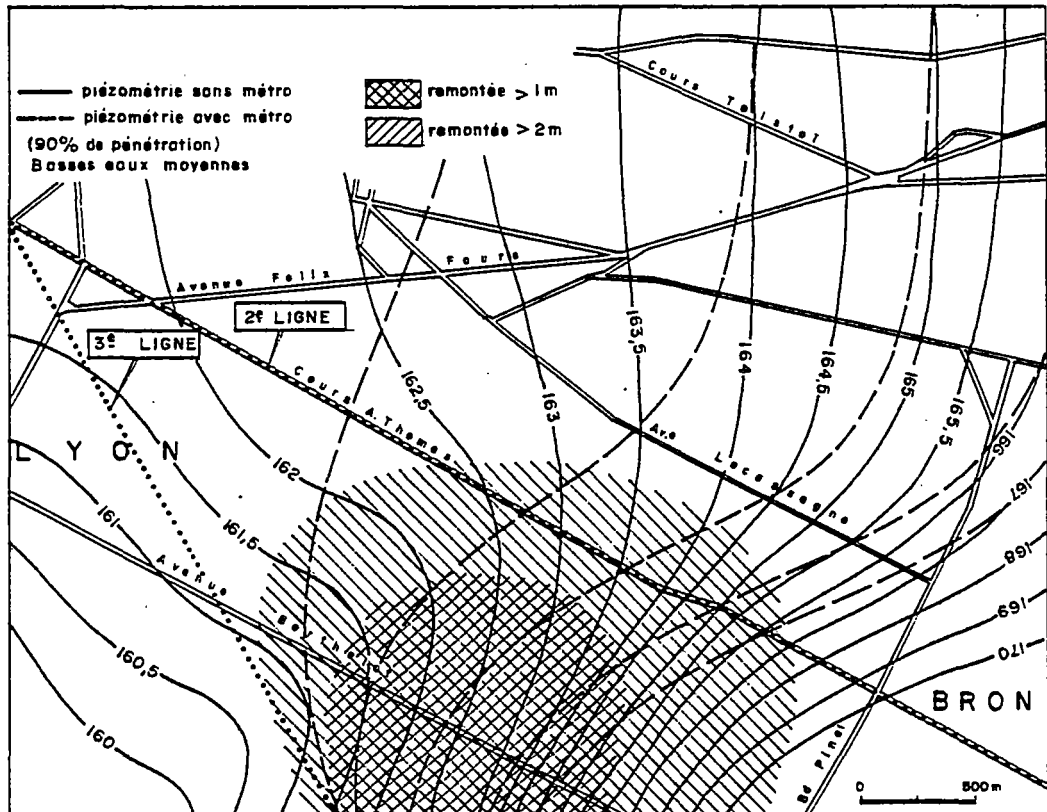


Figure 23 - Ville de Lyon : influence simulée du tube métro
Projet 1971 - deuxième et troisième lignes

☆ - Exemple d'aménagement souterrains : le métro de Lyon

On présentait, sans pouvoir le chiffrer, une influence notable de la réalisation du "tube métro" sur l'écoulement des nappes de la presqu'île et de la rive gauche du Rhône dans la mesure où il allait barrer l'aquifère sur 90 % de son épaisseur. Des modèles de simulation (fig. 22-23) ont montré que, pour la première ligne, l'influence était négligeable ; par contre pour les lignes 2 et 3, elle était notable puisque la remontée atteignait 2 m par suite du freinage des apports de la nappe en provenance des collines de Bron. Plusieurs hypothèses ont ainsi pu être étudiées avant de retenir la solution la plus adéquate.

☆ - Exemple d'aménagement de surface : la chute d'Iffezheim
(Haut-Rhin)

La mise en eau du barrage d'Iffezheim dans le cadre de l'aménagement du Rhin a entraîné une élévation de plus de 11 m du niveau du fleuve. Afin que cette remontée du fleuve occasionne le moins de nuisances possible par remontée de la nappe alluviale au voisinage de la retenue, une étude par modélisation a permis de définir et de calibrer une protection. Un voile d'étanchéité a été mis en place sous les digues en un point où le débit du contre-canal pouvait sans dommage excéder 1 m³/s par kilomètre d'installation. Des contrôles, après mise en eau définitive, ont montré que, dispositif en place, les relèvements de la nappe n'excédaient pas 1 m.

Les exemples concrets exposés montrent que l'hydrogéologue possède aujourd'hui les moyens et les outils de "bien prévoir". De plus en plus fréquemment ils sont employés car désormais bien connus à tous les niveaux (décideurs, aménageurs, entrepreneurs, etc.) et l'intérêt ainsi que le profit qu'on peut en tirer sont reconnus. De plus, en fonction de l'aménagement projeté, la législation peut imposer d'y avoir recours. Cependant, les nombreux cas cités en première partie révèlent que le problème de l'eau reste parfois totalement ignoré ou mal approché, ou bien que le caractère incomplet de la législation concernant les eaux souterraines, associée à un manque de perspicacité ou à une gestion des ressources à trop court terme, conduisent bien souvent à être confronté tôt ou tard à des désordres multiples.

Les quelques suggestions ci-après pourraient favoriser une prise de conscience des problèmes de l'eau dans tout aménagement concernant le sous-sol, accompagnée de la proposition de quelques mesures relevant des autorités administratives qui devraient réduire les problèmes dus aux remontées des nappes.

3 - Une meilleure information

Dans les grands aménagements, le comportement du sous-sol et celui des nappes en particulier est toujours pris en considération. Ce n'est pas systématiquement le cas pour des réalisations plus modestes (immeubles, maisons individuelles, etc.) non pas par désintérêt mais par simple ignorance de la présence d'une nappe fluctuante sous l'action de phénomènes naturels (précipitations, niveaux de rivière, etc.) ou sous l'action de contraintes artificielles (pompage, arrêt de pompage, etc.).

Auprès des responsables des petits aménagements, qu'il s'agisse d'un particulier, d'un architecte, d'un entrepreneur, d'une administration, il serait très profitable de mettre à disposition les données de base nécessaires à une connaissance même succincte du sous-sol auquel on s'intéresse. Certes cette mise à disposition est effective au niveau de certaines administrations (DDA, DDE, etc.) et du BRGM. Mais il faut admettre que la consultation constitue une démarche de plus, qui sera d'autant plus volontiers négligée que son intérêt est mal compris : on croit volontiers le problème disproportionné par rapport à l'aménagement qui est prévu.

Un effort doit en conséquence être consenti au niveau de la diffusion de l'information. Aussi les Schémas Directeurs d'Aménagements Urbains (SDAU) et les Plans d'Occupation des Sols (POS) pourraient-ils devenir un vecteur de cette information. Ces différents documents comporteraient un volet "caractéristiques du sous-sol" qui n'y figure pas actuellement.

Ce volet comprendrait, par zone constructible, les données que fournissent les Banques du Sous-Sol (Services régionaux), présentées sous une forme interprétée et synthétique.

Un mode de présentation commode consiste en la réalisation de cartes de profondeur des eaux souterraines dans la mesure où le caractère phréatique est reconnu, ainsi que de cartes thématiques : cartes de risques appliquées aux remontées de nappes, comme existent déjà des cartes de risques naturels. Les zones cartographiées doivent présenter par tranches de profondeur l'appréciation des risques en fréquence et en amplitude.

Devant le nombre croissant des projets qui concernent l'aménagement du sous-sol, certaines villes se sont dotées de tels moyens d'information, actuellement indépendants des documents officiels SDAU et POS, mais qu'il serait certainement avantageux de grouper. Les organismes publics auront un rôle actif dans la diffusion de cette connaissance, rôle d'information auprès des aménageurs, et de contrôle de la conception par le moyen des autorisations et permis de construire en retenant que l'information sera d'autant plus profitable qu'elle aura été apportée plus tôt dans la conception du projet.



IMPLANTATION DU BRGM EN FRANCE

Services géologiques régionaux

Nord - Pas-de-Calais : Gaston SOULIEZ

Fort de Lézennes - B.P. 26 - Lézennes - 59260 Hellemmes Lille
Tél. (20) 91.38.19 - Télex : 110114 Public X Lille F

Champagne - Ardenne : Pierre MORFAUX

13, bd du Maréchal Leclerc - 51100 Reims
Tél. (26) 49.93.40 - Télex : 830600 Public Reims

Picardie : Jean-Yves CAOUS

12, rue Lesclouvé - 80000 Amiens
Tél. (22) 89.49.52 - Télex : BRGM 150893 F

Pays-de-Loire : Jean-Claude LIMASSET

10, rue Henri Picherit - 44300 Nantes
Tél. (40) 29.36.00

Bretagne : Henri TALBO

14, avenue du Sergent Maginot - 35100 Rennes
Tél. (99) 30.94.51 - Télex : CRCL 730020 F Rennes "à l'att. du BRGM"

Région Centre : Jean-François ALLARD

10, avenue de Buffon - 45045 Orléans La Source Cedex
Tél. (38) 63.55.66 - Télex : BRGM A 780258 F

Ile-de-France : Jean LABOURGUIGNE

65, rue du Général Leclerc - B.P. 34 - 77170 Brire-Comte-Robert
Tél. (6) 405.27.07 - Télex : BRGM 210311 F / 229

Haute-Normandie : Philippe de la QUERIERE

18, rue Mazurier - 76130 Mont-Saint-Aignan
Tél. (35) 70.38.64 - Télex : BRGM 770517 F

Basse-Normandie : Claude DASSIBAT

2, rue du Général Moulin - 14000 Caen
Tél. (31) 74.59.90

Alsace : Jean-Jacques RISLER

204, route de Schirmeck - 67200 Strasbourg
Tél. (88) 30.12.62 - Télex : BRGM 880332 F

Lorraine : Jacques RICOUR

1, rue du Parc de Brabois - 54500 Vandœuvre
Tél. (83) 51.43.51 ou 51.46.60

Aquitaine : Michel COMBE

Avenue du Docteur Albert Schweitzer - 33600 Pessac
Tél. (56) 80.69.00 - Télex : BRGM 570528 F "pour BRGM Pessac"

Poitou - Charentes : Bernard BOURGUEIL

Place des Templiers - ZAC de Beaulieu - 86000 Poitiers
Tél. (49) 46.09.53 - Télex : 791316 Public X Poitr. F

Midi - Pyrénées : René BOINEAU

Avenue Pierre-Georges Latécoère - 31400 Toulouse
Tél. (61) 52.12.14 - Télex : ITAMP 530955 F poste D 27 "à l'att. du BRGM"

Languedoc - Roussillon : Henri PALOC

1039, rue de Pinville - 34000 Montpellier
Tél. (67) 65.81.13 - Télex : BRGM 490604 F

Rhône - Alpes : Gilbert RAMPON

43 bd du 11 novembre - B.P. 6083
69604 Villeurbanne-Croix-Luizet Cedex
Tél. (7) 889.72.02 - Télex : BRGM 380966 F

Alpes : Michel MESSIN

18, rue du Général Champon - 38100 Grenoble
Tél. (76) 87.37.01 - Télex : 320245 Public X GRENOF

Franche-Comté : Jacques CORNET

12, avenue Fontaine Argent - 25000 Besançon
Tél. (81) 88.03.11 - Télex : BRGM 361111 F

Bourgogne : Raymond ROIGNOT

Immeuble Caisse d'Epargne - 32 bd du Maréchal Joffre
21100 Dijon
Tél. (80) 72.42.31 - Télex : BRGM 350443 F

Auvergne : Michel JEAMBRUN

22, avenue de Lempdes - 63800 Courmon d'Auvergne
Tél. (73) 84.80.83 - Télex : BRGM 990489 F

Limousin : Jean CONSTANS

7, rue Descartes - 87100 Limoges
Tél. (55) 77.89.10

Provence - Alpes - Côte d'Azur : Michel CAILLÔL

Route Léon Lachamp - Domaine de Luminy - 13009 Marseille
Tél. (91) 41.26.04 ou 41.24.46 - Télex : BRGM 401585 F

Côte d'Azur : Alain GOUNON

Sophia-Antipolis - 06565 Valbonne
Tél. (93) 74.23.24

Corse : Roger DOMINICI

Immeuble Agostini - Z.I. de Furiani - 20200 Bastia
Tél. (95) 32.41.33

Outre-mer

Antilles - Guyane : Yves ATLAN

Km 0,9 - Route de Didier - B.P. 394
97204 Fort-de-France Cedex
Tél. (596) 71.88.68 - Télex : BRGM 912354 MR

Guadeloupe : Charly PAULIN

Z.I. de JARRY - B.P. 894
97175 Pointe-à-Pitre Cedex
Tél. (590) 26.63.58

La Réunion : Laurent STIELTJES

12, rue Alexis de Villeneuve - B.P. 1206
97484 Saint-Denis-de-la-Réunion
Tél. (262) 21.44.54 - Télex : 096150 RE

Services centraux de consultation des données sur le sous-sol

Données terrestres : Jacques FLORIN, 191, rue de Vaugirard - 75737 Paris Cedex 15 - Tél. 783.94.00 - Télex : BRGM 270844 F
Pierrette BOISGARD, B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél. (38) 63.80.01 - Télex : BRGM A 780258 F

Données marines : Nicole LENOTRE, c/o Centre océanologique de Bretagne - B.P. 337 - 29273 Brest
Tél. (98) 45.80.55 - Télex : OCEANEX 940627 F «pour BRGM»



Imprimé au B.R.G.M. - Département des Applications Graphiques