

# Les forages profonds : un autre après-mine ?

**Plus de 2000 forages profonds ont été réalisés dans le Bassin parisien, dont plus de 1 000 en Ile-de-France, essentiellement en Seine-et-Marne et dans l'Essonne. Si les exploitations du sous-sol par forages laissent peu de trace dans le paysage, elles sont plus insidieuses que celles résultant des mines classiques et sont susceptibles d'avoir des effets durables sur l'environnement. C'est pourquoi, aujourd'hui, toutes les dispositions sont prises pour éviter les atteintes durables aux nappes de l'Albien et du Néocomien.**

par Rémi Galin  
*DRIRE Ile-de-France*  
*Dvision sol et sous-sol*

Les conséquences de l'arrêt des exploitations minières ont pris une ampleur particulière, en 1996, avec les affaissements qui se sont produits dans l'est de la France. Les phénomènes en cause ont fait l'objet de beaucoup d'études et la compréhension des mécanismes en jeu a permis la mise en place d'outils de prévision. Le dispositif législatif du code minier a été récemment aménagé pour mettre en place les modalités d'une véritable gestion de l'après-mine ; les atteintes au patrimoine et les impacts sur la gestion

de l'eau font l'objet d'une attention particulière.

Il est une activité minière qui laisse peu de trace dans le paysage, mais qui est susceptible d'avoir des effets durables sur l'environnement : il s'agit des exploitations par forages. Il est vrai que tous les forages ne relèvent pas stricto sensu de l'activité minière, et qu'ils ne sont pas tous réglementés par le code minier, mais les risques engendrés par les forages sont semblables, dès lors que leur réalisation nécessite des machines de forage lourdes.

## Une histoire relativement récente

En 1859, à Titusville en Pennsylvanie, le colonel Drake donnait le véritable coup d'envoi de l'exploitation du sous-sol par forage, en réalisant le premier forage pétrolier à 21 mètres de profondeur. Il n'était pas le premier à réaliser un puits à vocation minière : au premier siècle avant notre ère, les Chinois du Sichuan faisaient des sondages de plusieurs centaines de mètres pour rechercher du sel.

En Ile-de-France, Louis Arago, le précurseur, avait dirigé les travaux du pre-

mier forage à l'Albien pour rechercher de l'eau. Pendant 8 ans, jusqu'en 1841, les ouvriers de l'entreprise Mulot ont creusé le sous-sol parisien jusqu'à la profondeur, inouïe pour l'époque, de 548 mètres.

Plusieurs dizaines de forages atteignant l'Albien sont réalisés en Ile-de-France dans les années 30, l'apparition de la technique du forage « rotary » ayant facilité considérablement les travaux. Dès le début des années 50, la France, à la recherche de son autosuffisance en pétrole, lance de grands programmes de recherches dans le Bassin parisien. A la même époque, Gaz de France recherche les structures géologiques susceptibles de stocker le gaz au plus près des lieux de consommation, afin de lisser les variations de la consommation entre l'été et l'hiver. Dans les années 70, les besoins en énergie incitent au développement de la géothermie à partir de la nappe du Dogger à

**Dès le début des années 50, la France, à la recherche de son autosuffisance en pétrole, lance de grands programmes de recherches dans le Bassin parisien**

près de 2 000 mètres sous le sol, en particulier à l'est de Paris et en Seine-et-Marne.

En fait, en tenant compte des forages profonds réalisés pour l'eau et d'autres recherches, ce sont plus de 2 000 forages profonds qui ont été réalisés dans le Bassin parisien, dont plus de 1 000 (voir la figure 1 ci-

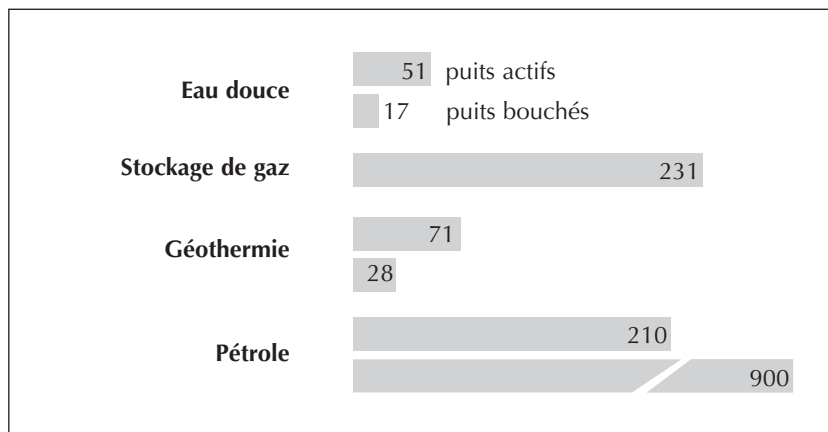


Fig. 1. - Les ressources accessible par forage profond en Ile-de-France.

dessous) en Ile-de-France, essentiellement en Seine-et-Marne et dans l'Essonne.

Près de 800 d'entre eux atteignent ou traversent tous les aquifères d'eau douce et, en particulier, les nappes de l'Albien et du Néocomien (voir les figures 2 et 3 ci-contre). Certes, les eaux souterraines ne contribuent qu'à hauteur de 2 % des besoins permanents en eau potable de la région ; ceux-ci sont assurés de manière très excédentaire par les usines qui traitent l'eau de la Seine, de la Marne et de l'Oise ; mais les nappes de l'Albien et du Néocomien représentent un intérêt particulier puisqu'elles constituent les réserves ultimes en cas de crise très grave avec pollution simultanée des trois cours d'eau précités et des eaux souterraines peu profondes.

La question posée aujourd'hui est celle de la vulnérabilité de ces nappes vis-à-vis de ces nombreux forages.

### Les risques du forage

La fonction d'un forage est de permettre l'accès à une couche géologique cible pour sa reconnaissance ou son exploitation. Dans ce dernier cas, le forage assure une liaison pour prélever un fluide (pétrole, eau, gaz) ou en injecter (géothermie, stockage de gaz). Le forage traverse des roches différentes susceptibles de contenir des fluides de caractéristiques variées. On sait, par exemple, que la salinité de l'eau augmente avec la profondeur et la rend ainsi impropre à la consommation humaine. Pour les forages d'eau en nappe captive, il faut veiller à la conservation de la ressource en quantité.

Les actions de creusement et d'exploitation peuvent conduire à des contaminations par les fluides utilisés, extraits ou injectés. Enfin, ces ouvrages cesseront d'être utilisés un jour, et un rebouchage insuffisamment pérenne - ou, pire, son absence - peuvent conduire à une contamination permanente.

L'ensemble de ces problèmes est aujourd'hui particulièrement bien appréhendé par les techniques mises en œuvre et la réglementation. L'exercice de cette dernière est assuré en Ile-de-France par la DRIRE pour les mines d'hydrocarbures et de géother-

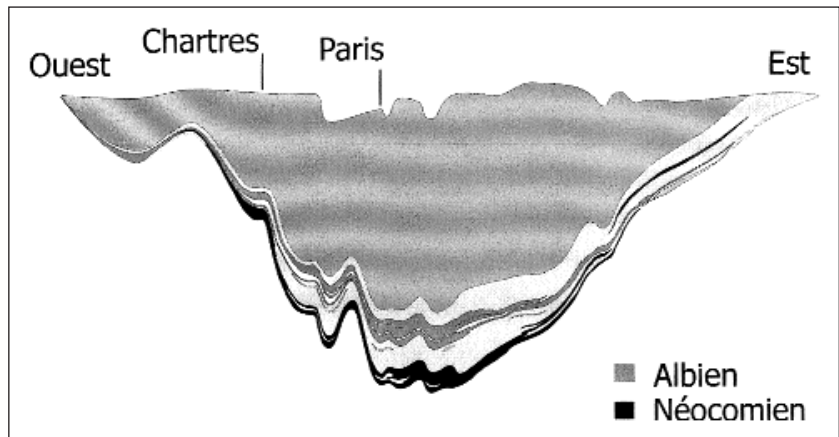


Fig. 2. - Coupe schématique du Bassin parisien.

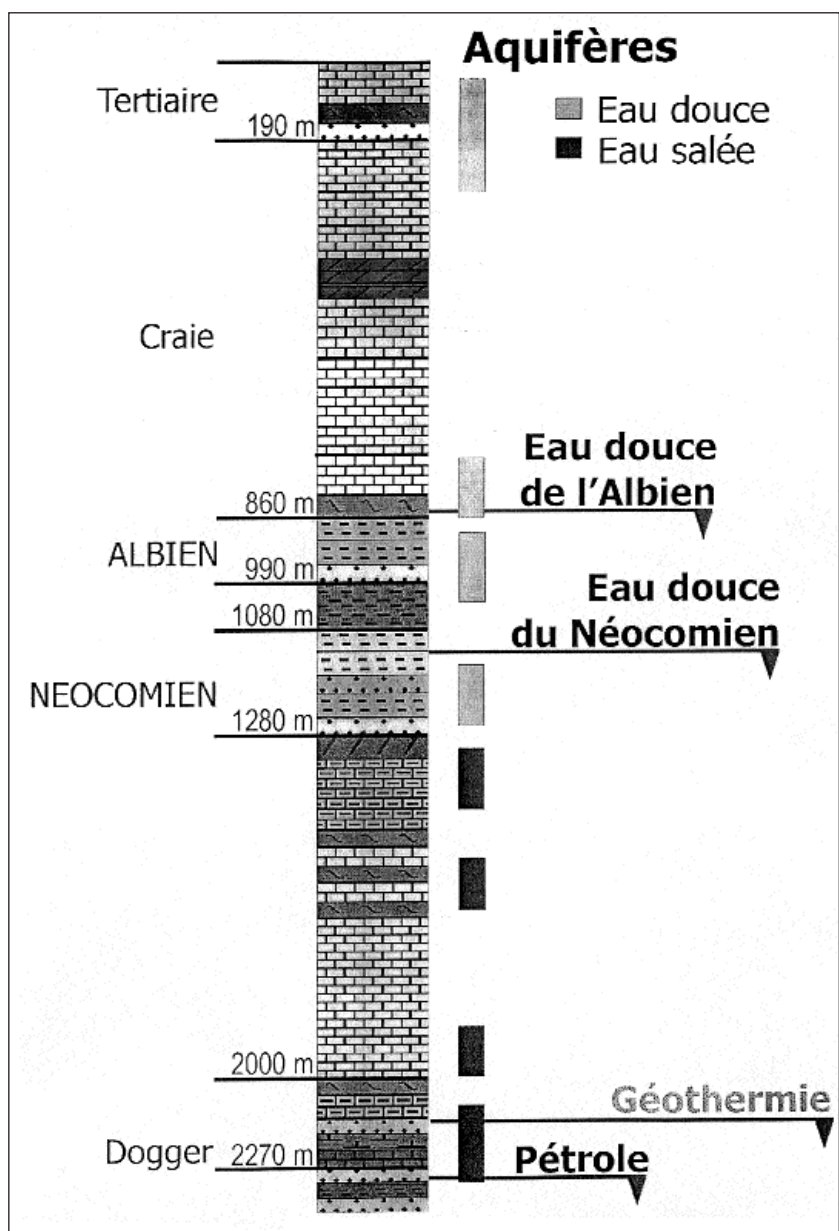


Fig. 3. - Coupe géologique indicative de la région de Marolles en Brie (Seine-et-Marne).

mie, les stockages souterrains de gaz et, pour l'eau, à partir du toit de l'Albien. Qu'elles relèvent de la loi sur l'eau, des ordonnances de 1958 sur les stockages souterrains de gaz en nappe aquifère ou du code minier (hydrocarbures et géothermie), les prescriptions imposées aux exploitants reposent sur les mêmes principes dont le détail a été publié dans le titre « Forage » du règlement général des industries extractives (RGIE), en mars 2000.

Le creusement d'un trou impose que trois fonctions soient réalisées simultanément :

- l'arrachage de la roche en fonds de trou ;
- la remontée des déblais en surface ;
- le maintien des parois du trou.

L'arrachage de la roche est réalisé par un outil en rotation continue ; les déblais sont remontés par un fluide dont la composition et la densité sont soigneusement calculées et suivies tout au long du forage. Cette boue assure également le refroidissement de l'outil et la tenue des parois jusqu'à la pose du cuvelage, généralement en acier. (voir la figure 4 ci-contre).

La composition de la boue doit être en adéquation avec le fluide contenu dans les roches. Ainsi, on utilisera pour les aquifères supérieurs des boues à l'eau au carbonate de calcium ou avec des polymères biodégradables et non toxiques.

La barytine sera retenue pour des couches géologiques plus profondes où son impact est négligeable en regard de la composition des fluides contenus dans les roches. Les boues à l'huile ou au fioul sont aujourd'hui réservées aux couches géologiques pétrolifères.

Une surveillance particulière doit être exercée pendant le forage afin de détecter les pertes dans les aquifères sensibles. C'est en particulier le cas dans les couches calcaires (Champigny notamment), mais l'utilisation de boues à base de bentonite sont utilisables et permettent de circonscrire rapidement les pertes. Le risque de pertes en cours de forage est aujourd'hui assez faible, car la géologie du Bassin parisien ne révèle guère de surprise.

La connaissance de la géologie joue un rôle important pour l'établissement du programme de forage. Celui-ci

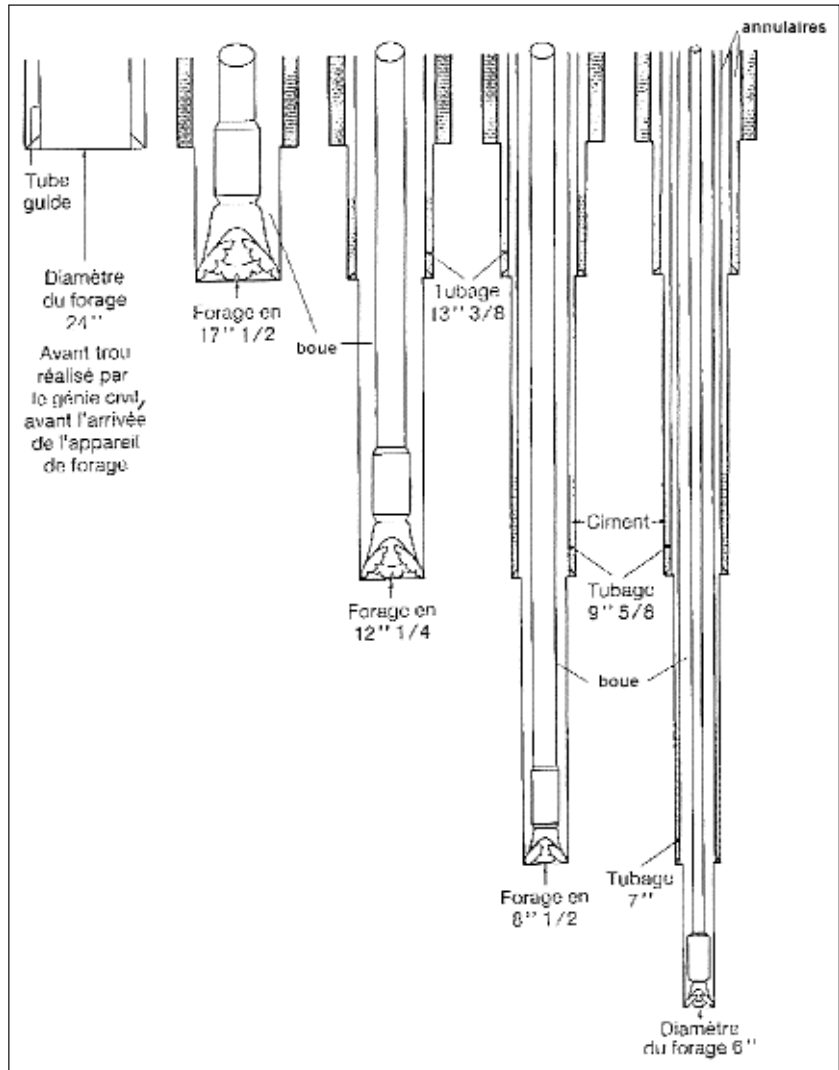


Fig. 4. - Coupes techniques d'un puits pétrolier phase par phase. Source : Editions Technip, Le forage, J-P. Nguyen, 1983.

détermine l'architecture du puits, le nombre et la position des cuvelages, de façon à isoler entre elles les couches de caractéristiques semblables ainsi que les types de boues qui seront utilisées. Un inventaire des risques, notamment les pertes ou les incidents de forages, conduit à approvisionner le chantier de forage en matériaux ou matériels requis (bentonite, trépars...). Une attention particulière est apportée au contrôle de la pression dans le puits : on pense aux éruptions qui sont cependant improbables dans notre région. A contrario, il faut être vigilant pour qu'en aucun moment la pression dans le puits ne dépasse la pression de fracturation des roches avec pour conséquence l'effondrement de l'ouvrage et le coincement du matériel du forage.

L'étape critique suivante est la cimentation entre le cuvelage et le terrain. Elle seule peut garantir l'isolement des couches géologiques entre elles pendant l'exploitation et bien après. La cimentation doit faire l'objet d'un travail soigné et contrôlé ; les foreurs remettent un rapport de cimentation permettant de valider les qualités et quantités de ciment mises en œuvre.

Les contrôles de cimentation peuvent se faire à l'aide d'outils spécifiques mesurant l'atténuation des ondes acoustiques (CBL : Cement Bound Log ; CET : Cement Evaluation Tool). Ces outils sont fiables pour des dimensions relativement petites (9'' 3/8 ou 244 mm) ; au-delà, des artefacts peuvent conduire à des interprétations erronées. En cas de mauvais résultats ou de

doutes, des cimentations complémentaires peuvent être réalisées.

Cependant, chaque dossier de nouveau forage doit anticiper l'échec du forage, il est donc systématiquement accompagné d'un programme de bouchage prévisionnel qui doit être approuvé par la DRIRE. Ce programme de bouchage doit répondre à des règles très précises qui résultent de l'expérience et fait partie aujourd'hui du règlement général des industries extractives.

## Les risques pendant l'exploitation

Pendant l'exploitation, les risques sont d'une autre nature. Il faut empêcher que les fluides transitant dans le forage ne gagnent les autres couches géologiques. La perte de confinement peut provenir d'une cimentation insuffisante ou dégradée, rarement constatée, ou des effets de la corrosion. Tous les percements constatés en Ile-de-France résultent de la corrosion interne et parfois externe. Les puits les plus exposés sont les puits géothermiques, en raison du fluide transporté et des conditions d'exploitation.

Des suivis d'exploitation basés, notamment, sur l'évolution des pressions sont de nature à permettre la détection des fuites ou des entrées dans le forage.

Les forages géothermiques sont particulièrement exposés à des risques de percement en cours d'exploitation. La nécessité d'une chambre de pompage ne permet pas le maintien d'un ou plusieurs annulaires de contrôle comme pour les puits pétroliers. Le fluide est particulièrement agressif et de nombreux percements ont été constatés dans les premières années d'exploitation sans pour autant, grâce à la distribution des pressions, conduire à des fuites. En effet, les pressions dans le forage peuvent, grâce aux pompages, être inférieures à la pression dans les terrains ; dans ce cas là, le fluide extérieur aura tendance à rentrer dans le forage.

Pour prévenir ces incidents, les exploitants sont contraints de contrôler périodiquement les cuvelages et les cimentations des forages d'exploitation et d'injection. Cette démarche, complétée par un traitement préventif par

inhibiteur en fonds de puits, a fait baisser la fréquence des incidents et permet de prendre des mesures de maintenance comme le re-chemisage.

D'une manière générale, l'exploitant détecte rapidement la perte d'intégrité d'un forage en exploitation et peut mettre en œuvre les mesures correctives qui limitent considérablement les effets des fuites éventuelles, lorsque celui-ci contribue directement à l'activité économique de l'entreprise.

L'activité d'exploitation pétrolière est sujette à des fluctuations importantes

liées au prix de vente du pétrole brut : les périodes fastes succèdent aux périodes difficiles. Dans le passé, certains forages d'exploitation peu rentables ont été mis à l'arrêt, l'exploitant attendant alors des jours meilleurs. Pour cela, les forages ont été mis sous cocons et remplis de fluide inhibiteur de la corrosion. Il est toutefois arrivé que ces précautions se soient révélées insuffisantes. Un cas de pollution de la nappe des calcaires de Brie par l'eau du Dogger a été constaté dans la région de Chailly-en-Bière (Seine-et-Marne) en 1992 : le puits a été repris, la pollution stoppée, la qualité de l'eau a été légèrement et temporairement altérée par augmentation de la salinité sans conséquence pour l'alimentation en eau potable.

Cette pratique est aujourd'hui solidement encadrée puisque aucun puits ne peut être laissé en fermeture provisoire plus de quatre ans ; pendant ce laps de temps, les puits concernés restent soumis à un contrôle périodique des pressions.

## Les risques après l'arrêt définitif du forage

Au fil du temps, la structure du forage inutilisé va se détruire par corrosion et mettre en communication toutes les formations géologiques entre elles. La nature a horreur du vide et certaines roches plastiques (marne, argile, sel) ont tendance à fluer, ce phénomène bien connu des mineurs est favorable à une reconstitution « naturelle » ; on ne saurait s'en contenter.

Deux cas principaux se présentent suivant que le bouchage est exécuté immédiatement après la réalisation du forage ou après une certaine période d'exploitation. Cette période d'exploitation peut aller de quelques années à plusieurs décennies ; ainsi, le premier forage d'Arago ne sera bouché que prochainement, soit plus de 160 ans après sa création. La problématique n'est évidemment pas la même, puisque, dans le deuxième cas, l'intérieur du forage

**Le premier forage d'Arago ne sera bouché que prochainement, soit plus de 160 ans après sa création**

peut être dégradé ou obstrué, et certaines informations impor-

tales provenant de la phase de création peuvent avoir été perdues. Dans les cas d'obstruction partielle, il convient d'adapter au mieux les règles exposées ci-après.

Toute opération de bouchage doit être précédée d'une phase préparatoire de rassemblement des informations sur la géologie et l'état de l'ouvrage, car il n'y a pas deux bouchages identiques. Il est procédé, tout d'abord, à l'analyse et à la synthèse des documents sur lesquels sont consignés les événements survenus lors de la foration initiale (notamment zones à pertes, à venues, stabilité des formations, etc.). L'analyse des diagraphies complète également la connaissance des terrains traversés. Les problèmes éventuels rencontrés en cours d'exploitation doivent également être analysés. Vient ensuite le diagnostic de l'ouvrage, avant de lancer la procédure d'abandon. Cette phase permet de vérifier l'état du puits afin d'établir concrètement le programme d'abandon. Suivant le cas et la complexité de l'ouvrage à traiter, on peut être amené à procéder aux opérations suivantes :

- contrôle du fond de puits, afin de vérifier la présence ou non d'éboulement dans le puits ;
- calibrage des tubages par outil de diagraphie (mécanique, ultrasonique...), afin de connaître les zones de corrosion éventuelles (ou dépôts) ; dans certains cas, un contrôle par vidéo caméra peut être également effectué ;
- vérification de la qualité de la cimentation annulaire des tubages par diagraphie ;

- analyse de la qualité chimique du fluide en place, de sa pression et des écoulements, afin de choisir une qualité de ciment compatible avec lui et, d'autre part, pouvoir, le cas échéant, lui adjoindre un inhibiteur de corrosion ;
- un test simple de mise en pression du tubage permet d'en vérifier l'intégrité.

Ce n'est qu'ensuite que le programme de bouchage peut-être défini avec précision en vue de restaurer l'isolation des différents niveaux géologiques perméables à débit potentiel par des barrières de façon à :

- interdire toute possibilité de fuite au jour des effluents ;
- prévenir la pollution et protéger l'utilisation future des aquifères ;
- empêcher la circulation des fluides entre les niveaux perméables.

Les barrières doivent être pérennes et, seuls les bouchons de ciment d'une longueur suffisante (au moins 50 m voire 100 m dans les défavorables), mis en place dans les cuvelages cimentés ou dans les annulaires, répondent à ce critère. La barrière de surface est constituée d'un bouchon de ciment d'au moins 50 m, surmonté d'une plaque boulonnée et soudée située à quelques mètres sous la surface du sol.

Chaque niveau perméable à débit potentiel est isolé au moins d'un autre niveau perméable, par une barrière d'isolation, ainsi que de la surface, par deux barrières d'isolation, sauf pour les niveaux perméables trop proches de la surface pour lesquels il est impossible de placer deux barrières distinctes d'une longueur suffisante.

La multiplicité des situations possibles rendrait fastidieuse la description des dispositions à mettre en œuvre, la figure 5 (voir ci-contre), issue des recommandations de l'industrie du pétrole, présente un cas simple.

## L'influence de l'hydrogéologie

Les risques de pollutions relèvent en premier lieu de l'intégrité du forage qui ne doit pas rompre l'isolement des couches créé par l'histoire géologique. Il convient d'examiner ce qui peut se produire quand cette intégrité est mise

en défaut, ce qui équivaut à considérer l'injection d'un fluide dans une nappe d'eau ou dans une roche poreuse.

La propagation d'éléments dissous dans une nappe dépend des principaux mécanismes suivants :

- la convection, qui est l'entraînement de l'élément à la vitesse moyenne de l'eau ;
- la dispersion, qui provoque l'étalement du nuage de pollution sous l'effet de l'hétérogénéité du milieu ;
- les échanges, avec la phase solide et la phase eau immobile ou adsorption ; ces échanges induisent un retard à l'avancement du polluant et atténuent les teneurs.

Pour apprécier ces mécanismes et les modéliser, il importe de connaître avec une précision suffisante les principaux paramètres hydrogéologiques des aquifères (porosité cinématique, perméabilité, gradient piézométrique). Le débit injecté dépend de la pression intérieure du forage et de la dimension du percement, la nature du fluide doit être également prise en compte.

Heureusement, si l'aquifère de l'Albien est assez bien connu, il n'en est pas de même pour le Néocomien qui est peu exploité.

Des scénarios de fuites provenant de forages géothermiques ont été examinés à la fin des années 80, et des calculs de propagation de contamination de l'Albien et du Néocomien ont pu être réalisés au prix d'hypothèses simplificatrices. Ainsi, dans le cas d'un aquifère homogène, isotrope, de hauteur faible et en négligeant les phénomènes de diffusion, on obtient (modèle de Muskat 1946) un panache ovale de grand axe parallèle à la vitesse de déplacement naturelle de la nappe. Si une fuite vers l'Albien avec un débit constant de 20m<sup>3</sup>/h n'était pas détectée après une année, la zone moyenne envahie serait inscrite dans un rectangle d'environ 200 m par 160.

En cas de fuite connue, il est possible d'en prévoir les conséquences, notamment vis-à-vis des éventuels captages d'eau à destination de l'alimentation humaine et de prendre les dispositions adaptées comme la maîtrise de la fuite et le pompage des eaux contaminées. Il est évident que les coûts sont très éle-

vés, un forage d'intervention à l'Albien coûtant au moins 5 millions de francs.

## Le cas des anciens forages

Les forages profonds réalisés, exploités ou rebouchés aujourd'hui, bénéficient des connaissances techniques et du retour d'expérience de cinquante années d'activité intensive dans le Bassin parisien. Une réglementation renforcée et une préoccupation partagée par tous les opérateurs concernés pour la protection des nappes profondes permettent aujourd'hui d'affirmer que toutes les dispositions sont prises pour éviter les atteintes durables aux nappes de l'Albien et du Néocomien.

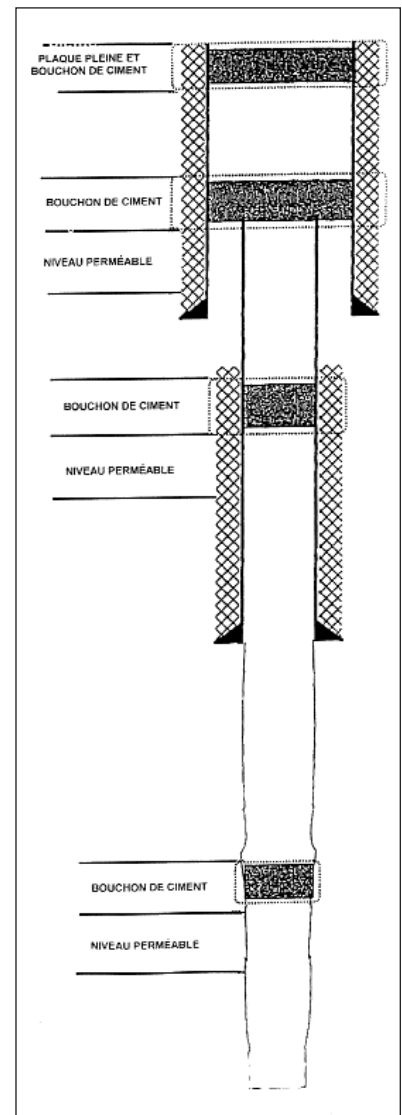


Fig. 5. - Exemple de bouchage d'un puits d'exploration.

Il n'en a pas toujours été ainsi. L'examen des dossiers de fin de sondage, archivés à la DRIRE, sont explicites sur le sujet. Sans s'étendre sur les conditions de réalisations des ouvrages et, notamment, sur les boues utilisées, le seul examen des modalités de bouchage montrent que les pratiques de l'époque sont très éloignées de celles d'aujourd'hui. On retrouve cependant fréquemment deux bouchons de dimensions variables, l'un assez systématiquement posé près des couches profondes et un sous la surface. Mais de nombreux autres cas se présentent. Une analyse exhaustive et méthodique s'impose pour juger des risques.

Le traitement de la question des risques engendrés par les forages anciens impose de définir une méthodologie adaptée et d'engager des moyens importants. Comme cela a été indiqué, le risque engendré par un forage dépend de sa conception, de ses conditions de réalisation, d'exploitation et de bouchage ; les bonnes pratiques sont aujourd'hui connues, il est donc possible d'établir une classification des forages en comparant chaque forage à ces pratiques. Les paramètres géologiques et hydrogéologiques déterminent, quant à eux, la sensibilité de la nappe à une éventuelle pollution. Le croisement de ces informations doit permettre d'établir des zones d'aléas et d'établir des propositions d'action pour renforcer la protection des aquifères concernés.

Le BRGM s'est vu confier cette étude financée par l'Agence de l'eau Seine-Normandie et sur crédits de service

public. Elle concerne tout le Bassin parisien.

A partir d'une étude documentaire sur les dossiers de forage et leur bouchage, les incidents et les modalités d'exploitation, il reviendra au comité technique de pilotage, animé par la DRIRE, la tâche délicate de définir et de pondérer les paramètres à prendre en compte, afin de procéder au croisement des risques liés aux ouvrages avec la sensibilité des nappes.

La qualité et la quantité des informations relatives aux forages disponibles auprès des DRIRE (dossiers au titre de la police des mines et des stockages souterrains), de la DIMAH (gestion du domaine minier par le service de conservation des gisements d'hydrocarbures), du BRGM (banque des données du sous-sol), de l'AESN et des opérateurs pétroliers ainsi que de Gaz de France apparaissent suffisantes pour réaliser un travail complet. Les nombreuses études réalisées sur l'Albien et le Néocomien apporteront les paramètres hydrogéologiques indispensables.

Les résultats sont attendus au premier semestre 2002 et devraient permettre d'apprécier la fragilité des nappes de l'Albien et du Néocomien et de proposer les moyens propres à renforcer leur protection.

## Des risques non négligeables

Les conséquences des exploitations du sous-sol par forage sont moins visibles

que celles résultant des mines classiques. Plus insidieuses, elles peuvent provoquer de graves dommages.

Les modalités actuelles de réalisation des forages avec l'utilisation de boues adaptées assurent une bonne protection des aquifères, de même que les exigences réglementaires et les pratiques des professionnels pendant la phase d'exploitation.

On peut être raisonnablement confiant sur la pérennité et la qualité des bouchages actuels. Cependant, les risques engendrés par les anciens forages ne peuvent être raisonnablement négligés. Leur étude approfondie, déjà engagée, devrait permettre, début 2002, d'en cerner l'ampleur. ●

---

## RÉFÉRENCES DOCUMENTAIRES

- Mémento des eaux minérales (1996 - 1999).
- Environmental guidance document well abandonment and inactive well practices for US exploration and production operations (API bulletin January 31, 1993).
- Titre forage du règlement général des industries extractives (mars 2000).
- Estimation de l'incidence de fuites hydrauliques à la paroi de forages géothermiques captant le réservoir du dogger (Institut mixte de recherche géothermique, A. Menjoz, J-L. Honegger, J-C. Martin ; juin 1988).
- Risque de pollution des nappes d'eau douce du fait des exploitations géothermiques de l'aquifère du dogger de bassin parisien (BRGM R 38034 - juin 1994).
- Recommandations de bouchage de la chambre syndicale de l'exploration-production d'hydrocarbures (1996).
- Cahier des charges de l'étude des risques engendrés par les forages profonds dans le Bassin de Paris (AESN, DRIRE IDF, DIMAH, avril 2000).
- Le forage pétrolier, J-P. Nyguyen, Editions Technip, 1983.