

Document public

Méthodologie relative aux déclarations de mise en place des pompes à chaleur sur nappe en Ile-de-France

BRGM/RP-52450-FR
août 2003

STIIIC



Ile-de-France

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

Ile-de-France

Document public

Méthodologie relative aux déclarations de mise en place des pompes à chaleur sur nappe en Ile-de-France

BRGM/RP-52450-FR
août 2003

L. Albouy
Avec la collaboration de
G. Brette, O. Goyénèche, J. Lemale, D. Poitral

STIIIC



Ile-de-France

A D E M E



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

Ile-de-France

Mots-clés : Pompes à chaleur, Eau souterraine, Forage d'eau, Hydrogéologie, Réglementation, Document d'incidence.

Albouy L. avec la collaboration de Brette G., Goyénèche O., Lemale J., Poitrinal D. (2003) - Méthodologie relative aux déclarations de mise en place des pompes à chaleur sur nappe en Ile-de-France. BRGM/RP-52450-FR, 126 p., 1 ann.

© BRGM, 2003 : Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM et de l'ADEME.

Synthèse

Les **installations de pompes à chaleur sur nappe** continuent à se développer en région parisienne car elles correspondent à des techniques de chauffage et de refroidissement particulièrement bien adaptées aux secteurs tertiaire et résidentiel. Par ailleurs ces équipements sont susceptibles de devenir une alternative à la tour de refroidissement des installations de climatisation au titre de la prévention des risques sanitaires.

Le Service Technique Interdépartemental d'Inspection des Installations Classées de la Préfecture de Police de Paris (STIIC) et la DRIRE de la région Ile-de-France ont demandé au BRGM de conduire une réflexion sur les forages associés à ces installations, sur les impacts des prélèvements et des rejets, sur la réglementation et les procédures en vigueur et sur le document d'incidence qui accompagne la demande d'autorisation ou la déclaration préalable.

Le travail a été réalisé dans le cadre des opérations de Service public du BRGM avec l'appui financier de l'ADEME Ile-de-France, qui par ailleurs a apporté une contribution technique.

Le BRGM a été chargé d'une mission d'expertise pour produire des documents synthétiques, check-lists et fiches techniques, d'aide à l'élaboration et à l'examen des dossiers.

Sommaire

Informations générales

Fiche 1 - Les intervenants d'une opération PAC sur nappe.....	9
---	---

Le projet

Fiche 2 - Dimensionnement d'une installation de chauffage par pompe à chaleur...	13
Fiche 3 - L'infrastructure souterraine d'une PAC sur nappe	19

La ressource : étude, recherche, captage, exploitation, rejet

Fiche 4 - Démarches administratives relatives au prélèvement de chaleur souterrain	25
Fiche 5 - Répartition des compétences entre services de l'État en Ile-de-France, pour l'usage thermique des eaux souterraines	27
Fiche 6 - L'étude de faisabilité pour la réalisation du forage alimentant une PAC sur nappe et pour le rejet	29
Fiche 7 - Sources d'informations utiles pour l'étude des infrastructures souterraines d'un projet de PAC sur nappe	35
Fiche 8 - Contenu d'un dossier de déclaration ou de demande d'autorisation de forage(s).....	39
Fiche 9 - Notions d'hydrogéologie et aptitude des nappes (0 - 100 m) à alimenter une PAC	45
Fiche 10 - La ressource en eau souterraine en Ile-de-France entre 0 et 100 m de profondeur	55
Fiche 11 - Réalisation des forages.....	59
Fiche 12 - Mise en place de la crépine et du massif filtrant et développement des forages d'exhaure et d'injection	71
Fiche 13 - Pompages d'essai et tests d'injectivité.....	75
Fiche 14 - Abandon provisoire ou définitif d'un forage.....	85
Fiche 15 - Équipement des forages d'exhaure et d'injection	87
Fiche 16 - Achèvement des travaux. Contrôles et réception des installations.....	93
Fiche 17 - Suivi et maintenance de l'infrastructure souterraine	95

Annexe : aspects réglementaires

Fiche I - Le Code minier.....	105
Fiche II - Le Code de l'environnement (partie législative) livre II « Milieux physiques ».....	107
Fiche III - Procédures d'autorisation et de déclaration. Décret N° 93-742 du 29 mars 1993 modifié.....	111
Fiche IV - Nomenclature des installations, ouvrages, travaux et activités soumis à autorisation ou à déclaration. Décret N° 93-743 du 29 mars 1993 modifié.....	115

Fiche V - Autorisation préalable pour tout forage au-delà de 80 m de profondeur dans les départements de l'Ile-de-France. Décret-loi du 8 août 1935	117
Fiche VI - Zones de répartition des eaux. Décret N° 94-354 du 29 avril 1994	119
Fiche VII - Code général des collectivités territoriales (partie législative). Article L 2223-5	121
Fiche VIII - Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles. Code de l'environnement (partie législative) Chapitre II : article L 562-1	123
Fiche IX - Prélèvements et consommation d'eau à l'intérieur d'une ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement). Arrêté du 2 février 1998	125

Informations générales

Fiche 1 - Les intervenants d'une opération PAC sur nappe

L'exploitant (au sens donné par l'administration), dépose la demande d'autorisation ou effectue la déclaration, auprès de l'administration.

Le maître d'ouvrage ou **l'assistant au maître d'ouvrage**, définit les besoins, choisit les entreprises spécialisées (en forages, installation de pompes, canalisations, pompes à chaleur, régulations et asservissements) et finance les réalisations. Il doit être éclairé par les ingénieurs conseils de l'intérêt du service rendu par des professionnels compétents.

Le bureau d'études thermiques, ingénieur conseil intervient dans la conception et la surveillance des travaux de surface. Lorsqu'il intervient comme **maître d'œuvre** d'une installation complète « clé en main », il doit réserver une place importante à l'ingénierie sous-sol, favoriser les associations de compétences et la conduite d'opérations dans un cadre pluridisciplinaire.

Le bureau d'études hydrogéologiques, ingénieur conseil expert du sous-sol et **hydrogéothermicien**, peut intervenir comme **maître d'œuvre** de l'infrastructure souterraine. Il collecte les données nécessaires, conçoit le projet de l'installation sous-sol à réaliser, rédige le cahier des charges pour l'entreprise de forage et le document d'incidence destiné à l'administration. Il confirme la position du forage, répond aux questions de l'administration et supervise la réalisation du (des) forage(s) notamment au cours des phases délicates et jusqu'à la mise en service de l'opération. Il assure la supervision des pompages d'essais, leur interprétation, l'échantillonnage d'eau et l'interprétation des analyses. Il rédige les consignes d'utilisation, d'exploitation, d'entretien, de maintenance et d'abandon des forages en distinguant les mesures de suivi et de contrôle et les opérations d'entretien et de maintenance à effectuer directement dans le(s) forage(s) par des entreprises spécialisées, habilitées pour ce type d'intervention.

L'entreprise de forage est chargée de mettre en œuvre les techniques de forage adaptées aux conditions des terrains rencontrés. Elle est consultée sur l'équipement du forage et sur les modalités de prélèvement ou d'injection. Généralement, elle est chargée d'installer la pompe d'exploitation et, éventuellement, la pompe de « rétro-lavage » dans un forage d'injection.

L'entreprise chargée de la régulation et des asservissements, doit prendre en compte les contraintes de chacun (variabilité des besoins en froid, régimes de pompage, régimes de réinjection par exemple) et faire remonter, éventuellement, les informations au niveau d'une gestion technique centralisée.

L'administration, chargée de faire respecter la réglementation dans le cadre des procédures en vigueur, évalue l'impact de l'opération en tenant compte du contexte collectif dans lequel elle s'inscrit et prescrit les mesures pour en atténuer les effets.

Des **établissements publics** et des **agences nationales d'objectifs**, peuvent sous certaines conditions, accorder des primes des subventions ou des prêts à taux réduit

pour la mise en œuvre d'une PAC. L'information est à solliciter auprès de l'ADEME, de l'ANAH et de EDF. De même, des incitations fiscales (crédit d'impôts, TVA réduite) peuvent être consenties dans certains cas.

La **procédure AQUAPAC** mise en place par l'ADEME, EDF et le BRGM est une procédure de « **Garantie sur la ressource en eau souterraine à faible profondeur, utilisée à des fins énergétiques** ». Cette garantie, offerte aux maîtres d'ouvrage, se décompose en deux phases :

- une **garantie de recherche**, liée à la découverte de la ressource en eau souterraine lors de la réalisation du forage ;
- une **garantie de pérennité** qui couvre le risque de disparition ou de modification de la ressource au cours de l'exploitation (5 ans lors de la mise en œuvre initiale de la garantie)

Ce type de garantie couvre donc l'aléa géologique lié à la mise en œuvre d'une ressource souterraine. Le contrat de garantie recherche doit être signé avant le commencement des travaux de forage. La garantie de pérennité ne peut être effective que si les opérations d'entretien et de maintenance sont effectivement mises en œuvre sur l'opération.

Le projet

Fiche 2 - Dimensionnement d'une installation de chauffage par pompe à chaleur¹

1. ÉVALUATION DES BESOINS THERMIQUES DE L'ENSEMBLE À CHAUFFER

L'évaluation des besoins thermiques d'un bâtiment dépend à la fois de ses caractéristiques (isolation, occupation, renouvellement d'air) et des conditions climatiques du lieu considéré.

Démarche simplifiée :

Un bâtiment est caractérisé par son coefficient **G** de déperdition volumique exprimé en Watt/m³/°C. L'installation de chauffage sera caractérisée par sa capacité à assurer la température intérieure souhaitée (par exemple 20 °C) pour la température extérieure la plus basse susceptible d'être rencontrée sur le site **Tem** (par exemple Tem = - 7 °C)

On considère généralement qu'il existe des apports internes (personnes et appareils) et externes (soleil) représentant de l'ordre de 2° à 3 °C.

La **puissance** à installer devra donc être supérieure ou égale à :

$P(W) = G \times V$ (volume à chauffer en m³) x {(T interne - T apports gratuits) - Texterne mini}

Pour calculer les **consommations**, il est nécessaire d'intégrer la fréquence d'apparition des températures extérieures nécessitant du chauffage que l'on caractérise par un nombre de degrés-jours unifiés (**DJU**) pour une température extérieure de non-chauffage (généralement 18 °C)

$$DJU = \sum_{Te = Tem}^{Te = 18^{\circ}C} Ne (18 - Te) \text{ (base 18)}$$

Ne représente la fréquence (en nombre de jours) d'apparition de la température extérieure.

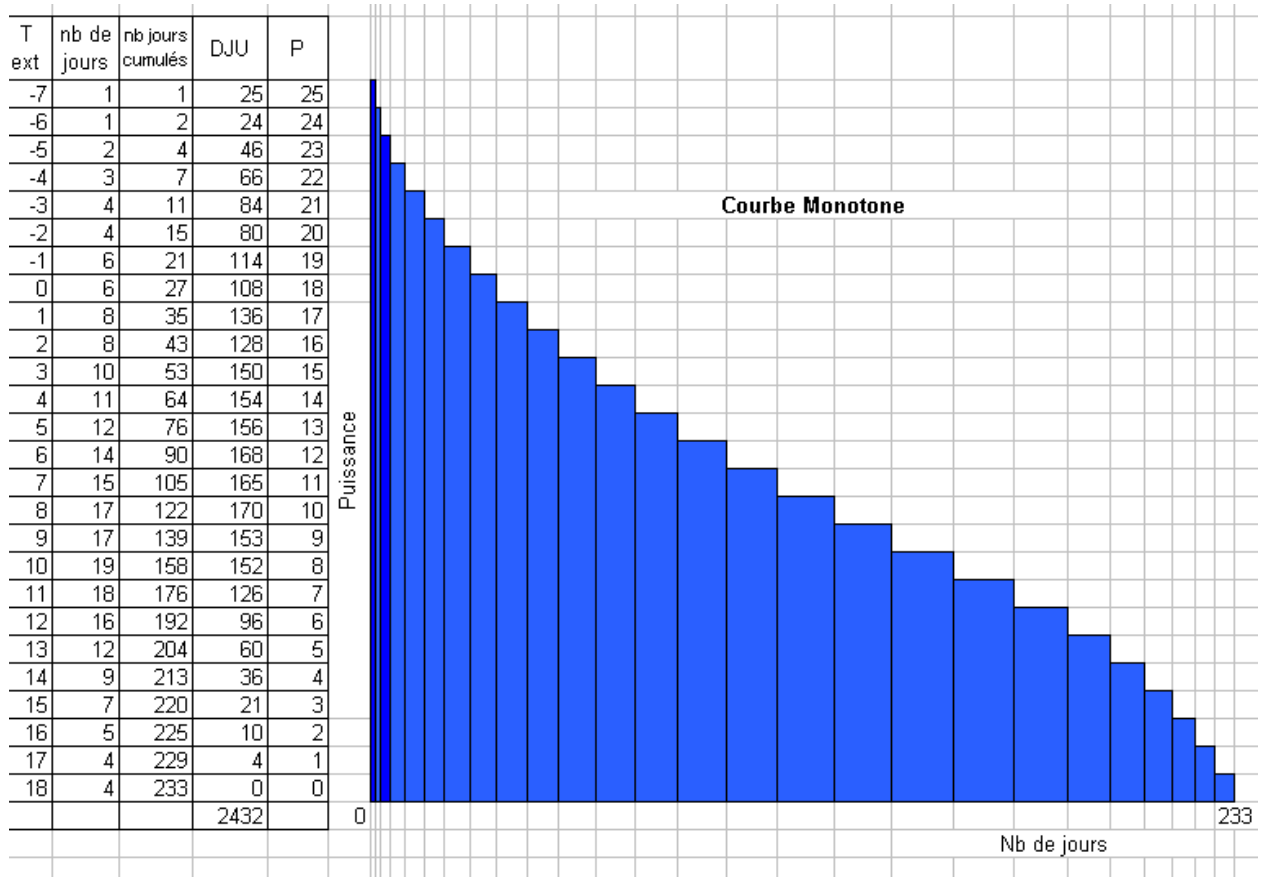
Quantité de chaleur utile nécessaire pour vaincre les déperditions du bâtiment :

$$Q \text{ (Wh)} = 24 \times G \times V \times DJU$$

Le graphique ci-après fait figurer pour chaque température extérieure la puissance nécessaire en ordonnées et le nombre de jours d'apparition de cette température en abscisse.

La courbe représentative des besoins en fonction des températures extérieures s'appelle courbe monotone, sa superficie représente les besoins thermiques de l'équipement à chauffer.

¹ Par Jean Lemale de l'ADEME IDF



Exemple :

Immeuble en région parisienne
 Surface à chauffer : 1 000 m², hauteur : 2,2 m
 G = 0,7 W/ m³ /°C
 Température interne (20 – 2) °C = 18 °C
 Température extérieure minimale : Tem = - 7°C

Puissance minimale nécessaire pour satisfaire la totalité des besoins « chaud » :

$$P = 0,7 \times 1\,000 \times 2,2 \times (18-7) = 38\,500 \text{ W soit } \mathbf{38,5 \text{ kW}}$$

Quantité de chaleur utile nécessaire :

$$Q = 24 \times 0,7 \times 1\,000 \times 2\,432 = 40\,857 \text{ kWh}$$

2. PRINCIPES GÉNÉRAUX RELATIFS AUX POMPES À CHALEUR

Le principe de la pompe à chaleur est connu depuis longtemps, si l'on prend pour origine l'énoncé des principes de la thermodynamique par Carnot (1824).

Une pompe à chaleur est système thermodynamique qui fonctionne entre deux sources : une source froide et une source chaude. Le principe consiste à transférer des calories de la source froide vers la source chaude, donc à un niveau de température supérieur. Ce transfert se fait via un fluide caloporteur et ne peut se réaliser, que s'il y a apport d'énergie sous forme de travail.

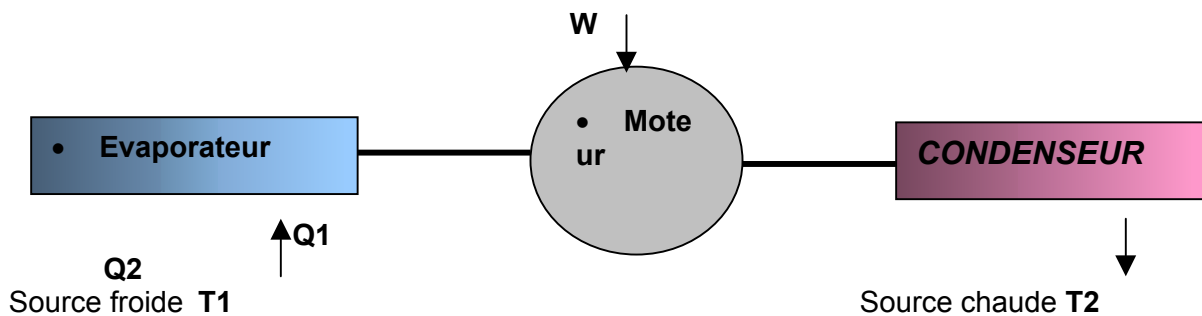


Fig. 1 - Schéma de principe d'une machine thermodynamique.

Si l'on désigne par :

- Q1 : la quantité de chaleur prélevée dans la source froide
- Q2 : la quantité de chaleur restituée au niveau de la source chaude
- W : l'énergie mécanique apportée au système
- T1 : Température d'évaporation à la source froide en Kelvin (évaporateur)
soit $T1 = t_1 + 273$ si t_1 est la température en degré Celsius de la source froide
- T2 : Température de condensation à la source chaude en Kelvin (condenseur)
soit $T2 = t_2 + 273$ si t_2 est la température en degré Celsius de la source chaude

On peut écrire d'après le premier principe de Carnot l'égalité suivante : **$Q2 = Q1 + W$**

On définit un coefficient de performance théorique (COP) qui est le rapport de la quantité d'énergie transmise à la source chaude (Q2) par la quantité d'énergie mécanique dépensée (W)

En application du deuxième principe de Carnot, le COP théorique ou idéal est égal à :

$$\text{COP} = T2/(T2 - T1)$$

On peut également en déduire un coefficient de réfrigération Cr, rapport de la chaleur absorbée à l'évaporateur à l'énergie reçue au compresseur.

$$\text{Cr} = Q1/W$$

Dans la pratique, du fait de la difficulté d'évoluer selon le cycle théorique et des rendements des équipements du système (moteurs, échangeurs, pertes de charges des circuits frigorifiques...) le COP effectif est affecté d'un coefficient de 0,4 à 0,7.

Pour les calculs économiques et énergétiques, on utilise le coefficient d'exploitation (COE) défini comme le rapport de la somme des besoins de chauffage à la somme des énergies consommées par la PAC, ses organes annexes et l'appoint éventuel. Le COE représente le fonctionnement sur une période donnée, généralement annuelle.

On mesure le coefficient de performance réel en faisant le rapport de la quantité d'énergie thermique fournie par le condenseur (P_c) par la quantité d'énergie électrique fournie au compresseur (W)

$$\text{COP} = P_c/W,$$

en désignant par P_{ev} la puissance prélevée au niveau de l'évaporateur, on a la relation :

$$P_c = P_{ev} + W = P_{ev} + P_c/\text{COP}$$

Important :

Il est important de noter la relation très étroite entre performance et l'écart de température entre la source froide et la source chaude. La source chaude étant constituée par les émetteurs de chaleur du bâtiment à chauffer, la loi de régulation de ces derniers a une grande importance. Il sera nécessaire de privilégier les émetteurs « basse température » du type plancher chauffant (loi de régulation 40 °C - 30 °C par - 7 °C) plutôt que radiateurs (loi de régulation 90 °C - 70 °C par - 7 °C)

3. ÉVALUATION DU DÉBIT D'EAU NÉCESSAIRE À UNE PAC SUR NAPPE

La quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 °C d'un m³ d'eau est égale à une thermie. La thermie est une ancienne unité, elle est égale à 10⁶ calories ou 1,163 kWh.

La capacité calorifique volumique de l'eau est par m³/ °C de :

$$1 \text{ thermie} = 10^6 \text{ calories} = 4,18 \cdot 10^6 \text{ Joule} = 1,163 \text{ kWh}$$

La puissance thermique prélevée sur un captage d'eau pour alimenter une PAC est proportionnelle au produit du débit pompé, par l'écart de température (dT) entre la température de l'eau de puisage et celle de l'eau de rejet (ou d'injection en cas de doublet) après échange thermique au niveau de l'évaporateur de la PAC.

$$P_{ev} \text{ (kW)} = 1,163 \text{ (m}^3/\text{h)} \times dT$$

On définit le débit nécessaire pour une puissance P_c à fournir par la formule :

$$V \text{ (m}^3\text{/h)} = P_c / 1,163 \text{ dT} \times (1 - 1/\text{COP})$$

Application à l'exemple du § 1 :

$P_{\text{utile}} (-7 \text{ °C}) = 38,5 \text{ kW}$

$P_{\text{nécessaire}} = 40 \text{ kW}$ (compte tenu des rendements de distribution)

$DT = 7 \text{ °C}$ (eau à 13 °C rejetée à 6 °C)

$COP = 4$

Débit maxi nécessaire = $3,5 \text{ (m}^3\text{/h)}$

Volume annuel pour assurer le chauffage = environ $12\,000 \text{ m}^3$

Fiche 3 - L'infrastructure souterraine d'une PAC sur nappe

La production de chaleur au moyen d'une PAC sur nappe, repose sur le prélèvement et le transfert de calories contenues dans l'eau souterraine vers les locaux à chauffer. Par ailleurs, une PAC peut assurer simultanément et/ou successivement des besoins en chauffage et/ou climatisation/rafraîchissement.

L'infrastructure souterraine est destinée à assurer le flux d'eau depuis la nappe, jusqu'à son point de rejet, en passant par un échangeur thermique d'une pompe à chaleur. Plusieurs schémas d'installation existent suivant les spécificités du projet.

Un **schéma à forage unique** comprend un ou plusieurs **forages de pompage** sans forage de réinjection.

Un **schéma avec doublet** comprend un ou plusieurs **forages de pompage** et un ou plusieurs **forages de réinjection** avec deux variantes possibles :

- **doublet non réversible** : chaque forage ne fonctionne que dans un seul sens : toujours en pompage ou toujours en injection ;
- **doublet réversible** : chaque forage fonctionne alternativement en pompage et en injection.

3.1. Forage de pompage

Le dispositif de pompage (ou de puisage), comprend **un forage** avec une **crépine** munie de perforations pour laisser passer l'eau et, généralement, **le massif filtrant** entre le terrain et la crépine, pour filtrer les particules du terrain susceptibles d'être entraînées par le pompage.

Une pompe immergée est installée dans le forage de puisage, (parfois deux pompes, pour sécuriser le fonctionnement ou pour disposer de plusieurs régimes possibles de pompage). Parfois un **variateur de vitesse** est installé pour moduler le débit de la pompe en fonction de la demande.

Une colonne d'exhaure amène l'eau de la pompe à la surface du sol, où elle est reprise par d'autres canalisations jusqu'à un échangeur de chaleur.

Très souvent, **un filtre** en tête de forage permet de diminuer ou d'éliminer les fines particules venant du terrain ou se formant dans le forage.

Parfois un **dispositif de traitement de l'eau** est prévu pour éviter des difficultés d'exploitation liées à la corrosion, à la formation de dépôts ou à la prolifération de populations bactériennes. En aquifère stratégique sensible, le choix des produits traitants utilisés doit être effectué avec prudence (biodégradabilité, concentration, etc.) et recevoir l'approbation des services de la DRIRE.

Le traitement peut être effectué en fond de puits producteur, via un dispositif ad hoc ou par injection périodique, depuis la surface au niveau du puits à traiter, de volumes déterminés du produit traitant.

Un **débitmètre** intervient dans la gestion de la régulation de l'installation et dans le contrôle des volumes pompés.

Des dispositifs de contrôle sont installés en tête de forage : **sondes de température, de pression, de niveau d'eau dans le forage**.

Des dispositifs de contrôle existent sur le reste du circuit « sous-sol » : **manomètres** en amont et en aval du filtre, en amont et en aval de l'échangeur, en tête d'un éventuel puits de rejet des eaux en nappe.

Une **canalisation de retour** après échange thermique, aboutit à un **point de rejet**.

3.2. Le rejet

a) Suivant le cas le rejet est fait dans le **réseau pluvial** ou dans un **réseau d'eaux usées**, unitaire ou séparatif ; dans quelques cas très rares, il peut se faire en tout ou partie, sur évaporateurs, directement dans l'atmosphère.

Le rejet dans un réseau existant, s'il est en général plus facile techniquement, n'est pas satisfaisant du point de vue environnemental et se trouve rarement autorisé par les administrations de la DRIRE ou de la MISE. En cas d'acceptation, il est également nécessaire d'obtenir une autorisation de rejet de l'eau auprès de l'exploitant du réseau qui prendra en compte la compatibilité du diamètre des canalisations et la capacité de l'éventuelle station de traitement avec les débits rejetés. Ce rejet sera effectué **moyennant une taxe de rejet** à s'acquitter auprès de l'exploitant.

Dans le cas où l'autorisation n'est pas accordée par l'exploitant, il est alors nécessaire de réaliser à ses frais un réseau d'évacuation jusqu'au point de rejet en milieu naturel le plus proche. A Paris, ce réseau doit être posé dans les collecteurs sous contrôle du gestionnaire du réseau. Une **taxe de rejet est également à acquitter**.

b) Dans certains cas, le **déversement dans le milieu naturel** est possible : par exemple une rivière, un lac, un fleuve. Il est alors nécessaire de créer la canalisation de rejet et de s'assurer que le milieu récepteur pourra accueillir, sans modifications significatives, les débits et les températures de l'effluent.

c) Le rejet peut, enfin, être réalisé dans un aquifère et dans ce cas, **obligatoirement la nappe du puisage**.

Dans le cas d'un rejet en nappe, la **réinjection** dans des aquifères sableux ou gréseux présente généralement des difficultés. Il est alors recommandé de fonctionner en circuit fermé, sans stockage intermédiaire, entre les puits de producteur et injecteur, afin d'éviter des entrées d'air, des pollutions par des particules en suspension, la précipitation de minéraux ou le développement de populations bactériennes ; tous évènements préjudiciables à la réinjection du fluide.

La faisabilité thermique du rejet doit être spécifiquement étudiée et notamment les risques de recyclage thermique entre les puits du doublet et l'influence éventuelle d'ouvrages voisins. L'étude déterminera notamment la distance entre puits et le positionnement spatial des ouvrages.

Dans tous les cas, une **étude de l'impact du rejet** doit être effectuée.

Le **forage d'injection** est équipé au minimum d'une **colonne d'injection** et parfois d'une **pompe d'injection** placée en surface.

Des **sondes de niveau d'eau** sont également prévues dans le forage d'injection pour suivre l'évolution des niveaux.

Parfois, le forage d'injection est équipé d'une **pompe de « rétro-lavage »** placée dans le forage, permettant d'inverser périodiquement les écoulements, afin d'évacuer des particules et diminuer les risques de colmatage.

**La ressource : étude, recherche, captage,
exploitation, rejet**

Fiche 4 - Démarches administratives relatives au prélèvement de chaleur souterraine

Les différentes fiches en annexe représentent une sélection des textes législatifs et réglementaires susceptibles de s'appliquer aux différentes opérations de PAC sur nappe.

Il n'est pas toujours aisé de clarifier l'application respective du Code minier, du Code de l'environnement (loi sur l'eau) et des décrets qui leur sont liés.

Selon le Code minier, les prélèvements de chaleur souterraine sont assimilés à l'exploitation d'une substance minérale qualifiée de « gîte géothermique ». L'article 17 du décret 78-498 du 28 mars 1978 fixe les seuils entre déclaration et autorisation en distinguant les « **exploitations géothermiques à basse température de minime importance.** »

Toujours selon le Code minier (article 131), tout forage au-delà de 10 m de profondeur doit être déclaré. Cette déclaration est indépendante et complémentaire de celles qui suivent.

Le décret 93-743 du 29 mars 1993 rubrique 1.3.2. : « Travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques » établit que c'est la procédure d'autorisation « loi sur l'eau » conforme au décret 93-742 du 29 mars 1993 qui s'applique. L'absence de référence aux « exploitations géothermiques à basse température de minime importance » laisse penser que l'application stricte de cette disposition semble exclure la procédure de déclaration.

En résumé, la réglementation définit des **seuils** au-delà desquels le maître d'ouvrage a l'obligation de **déclarer** ou d'obtenir une **autorisation** administrative avant de réaliser son opération. Si le projet ne fait pas l'objet d'une « procédure ICPE », les procédures de déclaration ou d'autorisation « loi sur l'eau » conformes au décret 93-742 du 29 mars 1993 s'appliqueront.

En pratique l'application des procédures « loi sur l'eau » est plus simple que ne le laissent prévoir les textes.

Pour un **forage avec simple déclaration** le service instructeur vérifie la prise en compte des **forages au voisinage de l'opération** et notamment les **captages AEP** (alimentation en eau potable), l'évaluation d'une **interférence** avec eux et la prise en compte de l'interférence avec une rivière. A ce stade, la description du projet est totalement fondée sur des hypothèses. En général, le service instructeur ne conteste pas les hypothèses et ne demande pas la validation des calculs d'interférence après réalisation des essais de débit. Il peut contester la **température de rejet** lorsqu'elle dépasse le seuil de 25 °C (retenu dans les captages AEP) et exiger la réalisation d'un **piézomètre de contrôle** de la nappe, avec suivis (niveau d'eau, température, conductivité...) ou la réalisation d'un **suivi des rejets en rivière**.

Pour un **forage soumis à autorisation en raison des seuils de profondeur**, (par exemple au-delà de 80 m de profondeur en Ile-de-France), l'administration délivre une

autorisation pour la réalisation du forage en admettant le principe d'un prélèvement en nappe assorti d'une réserve sur le **débit d'exploitation** qui sera autorisé. Après réalisation du forage et des tests de l'ouvrage et de la nappe, et éventuellement à la suite de nouveaux calculs d'interférence, l'administration délivre un **arrêté d'exploitation** qui fixe le volume annuel autorisé, le débit maximal autorisé, assorti de réserves dans le cas où la situation globale de la nappe viendrait à être modifiée.

Pour un **forage soumis à autorisation en raison d'un débit d'exploitation supérieur à 80 m³/h**, la démarche peut être identique à la précédente pour **tester l'ouvrage ou la nappe** mais pour une durée limitée, avec engagement de l'exploitant et, éventuellement un **arrêté provisoire** à durée limitée. Cependant l'exploitation réelle ne pourra se faire qu'après obtention de **l'autorisation d'exploiter**. Par ailleurs, l'exploitant peut aussi exploiter un ouvrage en restant sous le seuil d'autorisation (débit < 80 m³/h) en attendant son autorisation d'exploiter.

Fiche 5 - Répartition des compétences entre services de l'État en Ile-de-France, pour l'usage thermique des eaux souterraines²

Les missions des services de l'État s'exercent sous la responsabilité des préfets de département en fonction de leurs compétences. L'exploitant doit effectuer la demande d'autorisation ou la déclaration auprès du préfet de département ou du préfet de police pour les départements de Paris et petite couronne (92, 93 et 94). La préfecture est le « guichet d'entrée » unique de l'exploitant. Le dossier sera ensuite instruit par le service compétent, selon la répartition ci-après, **donnée à titre indicatif**.

Police des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)

Dans le cadre d'une opération PAC, il convient de prendre en compte à la fois les dispositions en matière de **police de l'eau**, et le cas échéant, les dispositions relatives à la **police des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)**.

En effet, lorsque le projet de captage (ou de rejet) en nappe est nécessaire au fonctionnement d'une ICPE, **une seule démarche est nécessaire**. La déclaration ou la demande d'autorisation au titre des ICPE vaut demande au titre de la loi sur l'eau (article L 214-1 du Code de l'environnement). Le volet « eau » du dossier doit être proportionné à l'impact de l'activité sur les milieux aquatiques.

En matière de police des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), la DRIRE d'Ile-de-France a compétence dans les départements de la grande couronne (77, 78, 91 et 95) et le STIIIC a compétence à Paris et dans les départements de la petite couronne (92, 93 et 94).

Police de l'eau :

Paris et petite couronne (92, 93 et 94)

Pour Paris et les départements de la petite couronne, ces compétences sont définies dans l'arrêté interpréfectoral n° 96-1052 bis du 23 mai 1996, portant « répartition des compétences géographiques en matière de police de l'eau et des milieux aquatiques dans les départements de Paris, des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne »

² Avec la contribution de la DRIRE IDF et du STIIIC

Pour l'usage thermique des eaux souterraines deux services sont concernés dans les conditions suivantes :

Nappes souterraines (*)		Service chargé de l'instruction des dossiers
Depuis le niveau naturel du sol jusqu'au toit de l'Albien	Paris	STIIC Service Technique Interdépartemental d'Inspection des Installations Classées (Direction de la protection du public de la préfecture de Police)
Depuis le niveau naturel du sol jusqu'au toit de l'Albien	92, 93, 94	DRIRE d'Ile-de-France (**)
Depuis le toit de l'Albien et en dessous	Paris, 92, 93, 94	DRIRE d'Ile-de-France

(*) Les nappes d'accompagnement des cours d'eau sont assimilées aux eaux superficielles. Les services instructeurs sont :

- le Service de la Navigation de la Seine s'il s'agit de cours d'eau domaniaux à Paris, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne ;
- les DDE (Direction Départementale de l'Équipement) ou la DRIAF (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Agriculture et de la Forêt) suivant le milieu défini dans l'arrêté s'il s'agit de cours d'eau non domaniaux dans les départements : Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne.

(**) En remplacement des DDASS (Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales) pour l'instruction des procédures concernant les rubriques 1.3.1 et 1.3.2 qui font référence aux usages géothermiques dans le décret 93-743 du 29 mars 1993.

Grande couronne (77, 78, 91 et 95)

Pour l'usage thermique des eaux souterraines (rubriques 1.3.1 et 1.3.2), la DRIRE Ile-de-France a compétence pour l'instruction des dossiers sauf dans le Val-d'Oise (95) où la police des nappes souterraines entre le sol et le toit de l'Albien est assurée par la DDE et la DDAF.

Fiche 6 - L'étude de faisabilité pour la réalisation du forage alimentant une PAC sur nappe et pour le rejet

Un projet de forage pour pompe à chaleur ne peut être bien conçu et bien réalisé que s'il s'appuie sur une bonne connaissance du milieu et sur une procédure opérationnelle bien maîtrisée. L'étude de faisabilité d'une PAC sur nappe comporte en général les phases suivantes :

- **collecte des données**, avec étude détaillée des dossiers de forages existants dans la zone d'étude ;
- **reconnaissance sur le terrain** pour l'acquisition de données complémentaires précises ;
- **évaluation des critères à prendre en compte** ;
- **cahiers des charges et devis détaillés**.

Collecte des données environnementales et du sous-sol

Le géologue collecte l'information nécessaire notamment auprès des administrations et des établissements publics spécialisés : Agences de l'eau, BRGM, DDAF, DDASS, DDE, DIREN, DRIRE, IGC (Inspection Générale des Carrières de la Ville de Paris), MISE (Mission Inter Services Eau)...

Cette collecte vise à connaître :

- le **milieu physique** depuis la surface jusqu'à l'objectif en profondeur : état du site du forage, sol superficiel et remblais éventuels, couches géologiques du sous-sol, niveaux aquifères, piézométrie, température, analyse d'eau, interprétations d'essais...
- les **zones à risques** : zones inondables, zones d'instabilité du sous-sol (mouvements de terrain, carrières souterraines, zones de dissolution et de corrosion de la roche), zones de pollutions du sol (potentielles ou avérées) ;
- les **contraintes environnementales** : périmètres de protection des captages pour eau potable, nappes surexploitées, périmètre du SAGE où les prélèvements de l'ensemble de la nappe sont limités, contrat de rivière, zones de sauvegarde de la ressource pour l'approvisionnement en eau potable, sauvegarde des milieux aquatiques dont les zones humides, obligation de réinjecter,...

Reconnaitances de terrain et réalisation de sondages de reconnaissance hydrogéologique

Si les données existantes sont trop imprécises, incomplètes ou trop éloignées du projet, une reconnaissance de terrain sera nécessaire. Cette reconnaissance peut inclure :

- recensement d'autres forages (captages ou rejet) dans le voisinage,

- levé piézométrique,
- campagne de géophysique,
- réalisation d'un ou plusieurs **forages de reconnaissance** pour acquérir des données précises : coupe géologique, tests au micromoulinet, gamma-ray, pompages d'essai, prélèvements et analyses d'eau.

Évaluation des aléas potentiels

L'historique des **anciennes activités** (industrielles ou de service) qui ont pu se développer dans le passé à la surface du sol et l'état actuel du sol permettent d'évaluer le risque potentiel de pollution du sous-sol par la surface. Cette connaissance permet de guider le choix du site du forage, en tenant compte de l'éloignement des sources de pollution et de la maîtrise des ruissellements. Si la **nappe est polluée**, elle devient en pratique inutilisable, à moins que son exploitation thermique ne s'inscrive dans un **schéma plus large de dépollution**. En effet, les rejets d'eau deviennent des **rejets d'effluents** qui ne pourront, sauf traitement adéquat être rejetés ni dans le milieu naturel, ni dans un collecteur pluvial.

Dans les **zones inondables** l'aléa est évalué à partir du **niveau des plus hautes eaux connues**, de la période de retour (crue décennale ou centennale) et de la vitesse du courant supposée. Il peut y avoir un impact sur le forage par introduction de particules fines voire de sables et graviers, comblant plus ou moins l'ouvrage lors d'une crue. Il faut alors prévoir des dispositifs tels que **tête étanche** ou simple **rehausse de la tête de forage**.

Dans les **zones inondables par remontée de la nappe** notamment en zone urbaine ou dans les secteurs où les remontées de la nappe noient les parkings souterrains comme dans certains quartiers de Paris (musée d'Orsay, Neuilly, boulevard Sébastopol...), la réinjection souterraine doit parfois être déconseillée. L'étude de faisabilité doit prendre en compte ce phénomène de façon très précise et, si possible, proposer des solutions adaptées au contexte hydrogéologique local (voir paragraphe « analyse hydrogéologique »).

La nature, la stabilité et les propriétés hydrauliques des terrains traversés en profondeur, permettent l'évaluation des **risques d'affaissement ou d'effondrement** à prendre en compte lors des travaux de forages ou en phase d'exploitation. Une évaluation détaillée doit être effectuée pour certaines couches de terrain. Par exemple **en présence de gypse, la circulation de l'eau sous l'effet d'un pompage accélère la dissolution de la roche**. Elle peut créer une cavité jusqu'à un point de rupture dépendant de la profondeur, de la résistance des couches supérieures, de la charge au sol, etc. En cas de rabattement local très important, la baisse significative de niveau d'une nappe libre peut être à l'origine de **perturbations hydromécaniques par tassements des terrains**.

Analyse hydrogéologique

Elle portera sur :

- l'identification des formations aquifères, imperméables ou semi-perméables, devant être traversées ;

- les comparaisons techniques et économiques, entre plusieurs nappes susceptibles d'être captées ;
- les caractéristiques hydrogéologiques de la nappe qui sera captée : profondeur, épaisseur efficace, transmissivité, gradient hydraulique, perméabilité, vitesse d'écoulement, débit exploitable, température, qualité chimique ;
- le nombre, le diamètre et la profondeur des forages nécessaires pour obtenir le débit d'exploitation souhaité ;
- l'influence de l'exploitation sur la nappe et les captages environnants (rabattements induits) suivant le dispositif envisagé ;
- le nombre, le diamètre et la profondeur des forages nécessaires en cas de réinjection.

En nappe libre, le niveau de l'eau doit être suffisamment profond. En effet, l'injection entraîne une remontée du niveau dans le forage et au voisinage de ce dernier. Cette remontée qui dépend du débit d'injection et de la perméabilité des terrains ne doit en aucun cas atteindre la proximité de la surface du sol. L'injection est plus facile à réaliser dans un aquifère dont le niveau est situé à 50 m sous le sol, que dans un aquifère où il se trouve à 5 m de profondeur.

Dans le second cas, la faible profondeur de la nappe limite le débit d'injection et l'on peut être obligé de prévoir deux, voire trois, forages d'injection pour un seul forage de pompage.

Analyse thermique

En cas **de rejet dans un réseau ou dans le milieu naturel**, l'arrêté du 23 février 2001 paru en application de l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 (JO n° 49 du 27 février 2001) fixe les prescriptions générales applicables aux rejets soumis à déclaration. Il prévoit, en son article 8, que la température du rejet ne doit pas excéder 30 °C et que la différence maximale de température entre l'eau prélevée et l'eau rejetée ne doit pas dépasser 11 °C.

Dans un schéma avec doublet, il est préférable que **l'ouvrage de réinjection** d'eau « froide » soit placé en **aval écoulement** de l'ouvrage de pompage d'eau « chaude ». L'angle fait entre **l'axe du doublet** et la **direction d'écoulement** de la nappe est à prendre en considération : plus cet angle est aigu, moins la température de l'eau « froide » réinjectée influencera l'ouvrage de pompage.

Le **panache d'eau « froide »** aura plus tendance à s'éloigner du puits de pompage que la **vitesse d'écoulement** de la nappe sera grande. Cette tendance est accrue lorsque la perméabilité de l'aquifère et le gradient de la nappe sont forts et lorsque la porosité de l'aquifère est faible. La réinjection dans un aquifère à perméabilité d'interstices, tel que les Sables de Fontainebleau ou de l'Yprésien, présentera des avantages et des inconvénients par rapport aux rejets dans les aquifères calcaires ou crayeux, les paramètres hydrogéologiques (perméabilité et vitesse d'écoulement) étant égaux. Les déperditions de calories puisées y seront plus lentes et un stockage de calories sera donc plus stable, mais inversement le panache du front froid réinjecté sera plus long à se dissiper.

Si un ouvrage de **pompage est influencé par une limite de réalimentation** comme un plan d'eau (sablrière ou rivière) en hiver, la température de l'eau pompée risque d'être plus faible que s'il n'y avait pas de telles réalimentations.

Lorsqu'il y a **présomption d'influences thermiques**, le traitement des données hydrogéologiques est réalisé au moyen de calculs analytiques et d'abaques hydrothermiques établis à partir de formules analytiques³ ou à partir de programmes mathématiques détaillés.

Le bureau d'étude ANTEA utilise souvent, notamment sur Paris une des fonctionnalités du modèle BRGM MARTHE aux différences finies.

Le modèle à mailles de tailles modulables prend en compte les exigences de précision dans certaines zones couvertes par le modèle (mailles de 5 m x 5 m autour des puits du projet, par exemple). Le modèle permet de restituer des cycles de fonctionnement ; il présente un gros avantage par rapport à d'autres modèles qui se contentent de raisonner avec des paramètres moyens pondérés de débits et de températures. Par exemple, l'outil permet d'effectuer les calculs pour une réinjection à une température de 28 °C, entre 8 et 20 heures, du lundi au samedi, une réinjection à une température de 18,5 °C, entre 20 heures et 8 heures, du lundi au samedi, une réinjection à une température de 18,5 °C, du samedi soir, à 20 heures, au lundi matin, à 8 heures). Le modèle permet de prendre en compte plusieurs couches géologiques. Il calcule la convection et la dispersion thermique en prenant en compte un coefficient de dispersion lié aux hétérogénéités du milieu, la conductivité thermique et l'épaisseur de chaque horizon. La précision des résultats dépend bien sûr de la qualité des données entrées dans le modèle (hypothèses simplificatrices prises ou mesures réalisées). Pour certaines données, ANTEA propose de réaliser une « sensibilité aux hypothèses », en faisant varier les valeurs du paramètre correspondant autour de la valeur la plus probable (variabilité du gradient d'écoulement, variation du sens d'écoulement de la nappe par exemple). Pour d'autres données (variabilité de la perméabilité, épaisseur de l'aquifère), ANTEA conseille de se caler sur des mesures complémentaires, proposées en option.

Il faut parfois attirer l'attention du client sur l'hétérogénéité de répartition verticale des écoulements et proposer un **test par micromoulinet**. Ce test permet d'identifier les venues d'eau réelles. Il a pour but de préciser la hauteur réelle des passées perméables de l'aquifère (parfois tout le débit pompé ou à injecter correspond à une hauteur de 2-3 m, alors que la hauteur de l'aquifère déduite des observations géologiques en cours de forage montre une hauteur de 20 m par exemple). Il permet de mieux dimensionner un éventuel second forage du doublet. Il permet aussi de préciser par le modèle mathématique, les débits et les températures d'injection. A titre d'exemple, il peut y avoir un écart de plus d'une dizaine de degrés selon que l'on considère que l'injection se fait de façon uniforme sur toute la hauteur de la couche géologique concernée ou seulement sur les passées les plus perméables.

³ Rapport BRGM 82SGN 023 EAU, Ausseur JY et Sauty JP. : « Exploitation Thermique des aquifères peu profonds ; manuel de préparation des pré-études de faisabilité technique »

Rédaction du document d'incidence et contact avec l'administration

L'analyse et la synthèse des données collectées permettront l'élaboration du **document d'incidence** qui doit accompagner la déclaration ou la demande d'autorisation destinée à l'administration. Il est recommandé de recueillir au préalable, l'avis de l'administration concernée.

Conception du projet, rédaction des cahiers des charges et des devis détaillés

Les données économiques et hydrogéologiques seront prises en compte dans l'estimation qualitative et quantitative du coût des forages et de leurs équipements.

Compte tenu des débits unitaires possibles (rarement plus de 200 m³/h), obtenus par forage (0-100 m), l'utilisation des PAC sur nappe dans cette tranche de profondeur n'est intéressante du **point de vue économique** que lorsque la température du fluide exploité atteint une valeur suffisante pour l'équilibre du projet. Si la réalisation de plusieurs doublets superficiels est requise, il convient de comparer cette solution à celle des captages nettement plus profonds (600, 1 000, 1 500 voire 2 000 m).

Dans les **aquifères sableux** : Sables de Fontainebleau et Sables de l'Yprésien, un **crépinage spécial** et un calcul précis de la **granulométrie du massif filtrant** sont à prévoir avec pour conséquence des **diamètres de foration** plus importants que dans les aquifères calcaires ou crayeux. Les **durées de développement** seront plus importantes et il risque d'y avoir des difficultés de **réinjection** de la totalité des eaux pompées.

La **qualité de l'équipement** du (des) forage(s) : PVC, acier ou inox, est un autre facteur à prendre en compte ; il dépend notamment de la **qualité des eaux**.

La distinction entre aquifères superficiels et aquifères plus profonds est également à prendre en compte dans l'économie de l'opération, car la **puissance électrique** nécessaire pour entraîner les pompes d'exhaure et/ou d'injection intervient dans les **frais d'exploitation**.

Le **tubage et les cimentations** seront prévus de telle sorte que le(s) forage(s) soit(ent) isolé(s) de toute source de pollution éventuelle. Le forage, qu'il soit de captage ou d'injection, n'exploitera pas deux ou plusieurs systèmes aquifères distincts et ne mettra pas en communication l'aquifère exploité avec la surface.

La tête du forage devra également empêcher toute intrusion ou infiltration d'eau de surface et d'éléments indésirables.

Ainsi tous les détails de la **conception des forages** seront consignés. Toutes les **contraintes techniques** identifiées seront décrites. Les diamètres des différentes sections seront établis afin de terminer l'ouvrage avec un dimensionnement acceptable au niveau de l'objectif.

Dans le bilan économique, le **coût de pose d'un réseau** n'est pas négligeable surtout si le projet est éloigné du point de rejet. Dans le cas de réalisation d'un réseau à l'intérieur d'un collecteur (Paris), outre la fourniture et la pose qui sont de l'ordre de

690 euros HT du mètre, il est nécessaire d'acquitter un droit d'occupation du collecteur, calculé selon la formule suivante :

$$\text{Tarif annuel en € HT (valeur 1999)} = [(0,0046 \times \phi \text{ cm}^2) + 1,52] \times \text{longueur en m}$$

La conception du projet, avec la participation de thermiciens de surface et d'hydrothermiciens, conduira à la réalisation de **programmes de travaux** objets d'appels d'offres auprès d'entreprises spécialisées.

Les possibilités d'obtention de **primes** et les **redevances** seront prises en compte dans le bilan économique précis qui sera effectué.

À l'inverse, le paiement des taxes de prélèvement d'eau et de rejet dans le milieu naturel devra également être pris en compte dans ce bilan économique :

- en 2003 en Ile-de-France, l'Agence de l'eau Seine-Normandie prélève une redevance de 45,83 euros par 1 000 m³ pompés ;
- les communes ou leurs concessionnaires perçoivent généralement des taxes de rejet. À titre indicatif, le coût de rejet à Paris est de l'ordre de 0,39 euros HT par m³ rejeté.

À ce terme, le maître d'ouvrage décidera de la poursuite des travaux.

Fiche 7 - Sources d'informations utiles pour l'étude des infrastructures souterraines d'un projet de PAC sur nappe

Accès aux données de forages (banque du sous-sol)

Le portail (<http://infoterre.brgm.fr>) permet l'accès aux banques de données numériques du BRGM, notamment aux données des forages enregistrés dans la **banque du sous-sol (BSS)**. Toutes ces données peuvent être recherchées puis cartographiées dynamiquement sur la zone d'intérêt définie interactivement par l'utilisateur. La définition de la zone d'intérêt peut s'effectuer par recherche géographique ou par mots-clés. Par ailleurs, les informations peuvent être obtenues auprès du Service géologique régional et au Centre de consultation à la Maison de la géologie, rue Claude Bernard à Paris.

Accès aux données piézométriques

Le site Internet du réseau piézométrique Seine-Normandie : (<http://agences.eau-brgm.fr>) permet d'accéder aux chroniques piézométriques des piézomètres sélectionnés comme représentatifs des aquifères présents dans le bassin et régulièrement suivis depuis plusieurs décennies.

Par ailleurs, ***l'Inspection Générale des carrières de la Ville de Paris (IGC)*** mesure le niveau des différentes nappes superficielles sous Paris au moyen d'un réseau qui compte actuellement 280 piézomètres. La constitution et l'alimentation d'une base de données sur le niveau des nappes permettent à l'IGC de fournir les renseignements aux entreprises, experts et particuliers, notamment dans la zone de dissolution des gypses antéludiens.

Accès aux données sur les eaux souterraines : la banque de données ADES et le Référentiel Hydrogéologique (BD RHF)

Le BRGM est chargé de fédérer toutes les informations (réseaux, points de mesures, résultats des mesures...) et de développer tous les outils informatiques spécifiques à l'acquisition, à la gestion et à la diffusion des données. Toutes ces données devront satisfaire à un langage commun pour pouvoir être utilisées facilement par les acteurs de l'eau, selon le standard établi par le SANDRE (Secrétariat d'Administration Nationale des Données Relatives à l'Eau). ADES est disponible sur Internet : <http://ades.rnde-tm.fr/>

Le référentiel hydrogéologique (BD RHF), est une nomenclature de toutes les nappes d'eau de France. Il comporte une carte de découpage et de répartition ainsi qu'un ensemble de fiches descriptives, à raison d'une fiche par unité aquifère. Ce référentiel est consultable sur le site du Réseau National des Données sur l'Eau (RNDE) : (<http://www.rnde.tm.fr>). Il peut être mis à disposition sous la forme de CD-ROM.

Accès aux données sur les carrières abandonnées en Ile-de-France et sur les zones de dissolution de gypse

Les anciennes carrières représentent au total une superficie de plus de 5 000 ha ; elles sont réparties sur plus de 300 communes de l'Ile-de-France.

Les anciennes carrières de gypse se rencontrent à Paris dans les 10^e, 18^e, 19^e et 20^e arrondissements (65 ha sous-minés), dans les Hauts-de-Seine (150 ha), la Seine-Saint-Denis (482 ha), le Val-de-Marne (104 ha), les Yvelines (530 ha), le Val d'Oise (220 ha) et la Seine-et-Marne.

Les anciennes carrières de calcaire grossier se rencontrent à Paris dans les 5^e, 6^e, 12^e, 13^e, 14^e et 15^e arrondissements (770 ha), dans les Hauts-de-Seine (1 014 ha) et dans le Val-de-Marne (565 ha), les Yvelines (250 ha), le Val d'Oise (340 ha) et la Seine-et-Marne.

Les carrières de craie se rencontrent dans les Hauts-de-Seine à Issy-les-Moulineaux, Sèvres, Meudon et Clamart (35 ha) et dans les Yvelines (80 ha).

La prévention des risques est assurée par :

- L'Inspection Générale des Carrières de la Ville de Paris pour les départements de Paris, des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne : 1, place Denfert Rochereau 75014 PARIS - Tel. : 01 40 47 58 00.
- L'Inspection Générale des Carrières des Yvelines, du Val d'Oise et de l'Essonne : 5 rue Pierre Lescot 78000 VERSAILLES - Tél. : 01 39 51 27 50

L'Inspection Générale des Carrières rassemble les informations à l'aide de cartes de carrières et de bases de données pour tenir à jour des informations concernant le sous-sol. Ces informations sont à la disposition du public : particuliers, constructeurs, entreprises, bureaux d'études... Elles sont données lors des mutations immobilières aux notaires qui en font la demande. Une cartothèque numérique facilitera l'exploitation des **457 cartes des carrières de Paris et des départements limitrophes**. Cela permettra d'améliorer la qualité du service rendu aux usagers : concessionnaires, architectes, citoyens...

La gestion des risques liés aux anciennes carrières implique une bonne connaissance des sous-sols et l'imposition de sujétions particulières lors des opérations d'aménagement ou de constructions publiques ou privées.

L'Inspection Générale des Carrières examine toute demande de permis de construire (hormis pour quelques communes de la Seine-Saint-Denis) situé au-dessus d'anciennes carrières et formule un avis contenant des prescriptions techniques concernant les fondations du bâtiment et/ou la consolidation du terrain qui est appelé à le supporter. Cependant la définition, le dimensionnement et la réalisation des travaux de mise en sécurité restent de la responsabilité du maître d'ouvrage et des entreprises qu'il a mandatées.

Comme indiqué ci-dessus, le territoire d'activité de l'Inspection Générale des Carrières (IGC) ne concerne pas le département de Seine-et-Marne (77). Sur ce dernier, des études spécifiques ont été réalisées par le BRGM, à l'échelle de la commune, sur le bassin de Chelles. Un inventaire sur l'ensemble de ce département est en cours de réalisation.

Accès aux données sur les cavités souterraines

Le site (<http://www.bdcavite.net>) permet d'accéder à la Base de données nationale des Cavités Souterraines en France métropolitaine (ouvrages souterrains d'origine anthropique - à l'exclusion des mines - et naturelle).

Accès aux données sur les sites pollués ou potentiellement pollués

Le site Internet « Forum Actualités Sites Pollués <http://www.fasp.info> diffuse l'information relative aux outils méthodologiques pour la gestion des sites (potentiellement) pollués et l'accès aux données d'inventaires :

- **base de données BASOL** sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif. Ce recensement des sols pollués par département et par ville, est également disponible à la DRIRE ;
- **base de données BASIAS** créée avec les données des Inventaires Historiques Régionaux (IHR) des sites industriels et activités de service, en activité ou non. Cette base est également accessible directement au moyen de l'adresse suivante : <http://basias.brgm.fr>. En Ile-de-France en fin d'année 2002 les données relatives aux départements de l'Essonne et des Yvelines sont disponibles.

Le site (<http://www.iaurif.org/fr>) est signalé aux internautes intéressés par les questions d'urbanisme, de développement et d'aménagement du territoire. Il assure le lien avec les sites, particulièrement utiles, d'institutions, d'organismes ou de collectivités en relation avec les activités de l'IAURIF (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France) et ses domaines d'intervention.

En plus de ces bases de données d'autres sources d'information existent :

- la carte géologique de la France à 1/50 000,
- les fonds documentaires constitués par les études hydrogéologiques réalisées dans les secteurs considérés et qui peuvent être détenus par des organismes publics tels que : DRIRE, DIREN, DDASS, DDAF, BRGM, collectivités locales...

Fiche 8 - Contenu d'un dossier de déclaration ou de demande d'autorisation de forage(s)

Identification de l'opération

- Identification des intervenants : exploitant, maître d'ouvrage, ingénierie surface (concepteur/installateur spécialiste en génie climatique), ingénierie sous-sol (bureau d'étude hydrogéologique, entreprise de forage...), expert, ...
- Mission des intervenants : concepteur, maître d'œuvre, installateur, responsable d'opération et coordonnateur...
- Localisation de l'opération : adresse et références cadastrales.
- Type et importance de l'opération à effectuer :
 - puits de captage simple ou doublet,
 - puissance maximale,
 - débit maximal,
 - durée d'exploitation sur l'année,
 - écart de température prévu
 - débit horaire moyen rapporté à l'année.
- Durée prévisionnelle d'amortissement économique de l'investissement.
- Description détaillée du site et des travaux préparatoires : accès, urbanisation...

Pièces à joindre : implantation du projet sur carte IGN 1/25.000 et plan de masse sur extrait de plan cadastral.

Contexte collectif dans lequel s'inscrit l'opération

- Compatibilité du projet avec les dispositions du SDAGE, du SAGE, du Contrat de rivière...
- Contraintes ou servitudes liées aux :
 - zones de répartition des eaux,
 - zones de sauvegarde de la ressource pour eau potable,
 - zones inondables,
 - plans de Prévention des Risques Naturels (PPR),
 - projets d'Intérêt Général (PIG),
 - périmètres de risques liés aux anciennes carrières souterraines ou à l'existence de poches de gypse, délimités ou non par arrêté préfectoral,
 - activités industrielles présentes ou anciennes,
 - captages ou forages de rejet existants pour d'autres usages (eau potable, irrigation agricole, processus industriels...)

Pièces à joindre en indiquant les sources d'information : situation du projet sur un extrait de la carte géologique avec positionnement des ouvrages existants distingués par types d'usages, des périmètres de protection pour captage d'eau potable dans un rayon de 500 m, des périmètres de protections particulières concernant la nappe sollicitée.

Étude hydrogéologique des conditions d'alimentation et d'exploitation du niveau aquifère ciblé

- description détaillée du cadre hydrogéologique régional en indiquant les sources d'information,
- description détaillée de la cible choisie : entité hydrogéologique, nature, type (préciser s'il s'agit d'une nappe d'accompagnement d'un cours d'eau) et géométrie de l'aquifère ; paramètres hydrodynamiques locaux : épaisseur efficace (ou productrice), perméabilité, transmissivité, débit exploitable par forage, coefficient d'emménagement, sens et vitesse d'écoulement, nature et distance des limites, recharge et drainance, température moyenne, historiques des prélèvements lorsqu'ils sont disponibles, chroniques et cartes piézométriques, qualité physico-chimique de l'eau.

Pièces à joindre en indiquant les sources d'information : cartes et coupes montrant les aquifères, leurs caractéristiques et leurs relations.

Cahier des charges du (des) forages, des pompages d'essai et des tests d'injection

- description du projet de forage(s) ;
- coupe géologique et technique prévisionnelle détaillée ;
- moyens techniques à mettre en œuvre ;
- conditions d'accès (obstacles pour l'amenée de la sondeuse), surface disponible pour l'atelier de sondage ; préciser si le(s) forage(s) est (sont) à réaliser en sous-sol (hauteur disponible, résistance des planchers) ou en fond de fouille (caractéristiques de la rampe d'accès ou moyens de levage) ;
- coordination des travaux avec les autres intervenants (pose de canalisations, alimentation électrique, échangeurs, asservissements...) ;
- normes de sécurité, Plan Particulier de Sécurité et Protection de la Santé (PPSPS) ;
- spécifications pour pompages d'essai et tests d'injection longue durée ;
- spécifications pour essais de fonctionnement en boucle, incluant le circuit des échangeurs ;
- spécifications pour prélèvement d'eau pour analyse.

Schéma d'exploitation, impacts des prélèvements et gestion des rejets

Prélèvements

- besoins énergétiques : puissance de pointe de l'installation, cycles de fonctionnement, évolution des besoins ;
- estimation des débits d'exhaure moyens et de pointe, durée de fonctionnement envisagée, nombre d'ouvrages à réaliser ;
- écart thermique exploitable ;
- incidence des prélèvements sur la nappe et les ouvrages voisins existants ;
- incidence des éventuels produits chimiques utilisés lors de la foration ou de la maintenance des installations ;
- évaluation des perturbations hydromécaniques par tassements ou entraînement de fines ;
- stabilité du bâti au niveau des zones à dissolution de gypse ;
- évaluation du risque de pollution accidentelle au niveau des échangeurs thermiques ;
- absence totale de communication du réseau issu du forage avec d'autres réseaux hydrauliques (en particulier pas de liaison possible avec un réseau d'alimentation en eau potable, même lorsque celui-ci vient en secours de l'alimentation des échangeurs) ;
- dispositifs prévus en cas d'abandon de l'ouvrage (ouvrage devenu vétuste, par exemple ou abandon pour d'autres raisons techniques ou économiques).

Rejets

• Rejets dans les eaux superficielles :

- description du schéma de rejet ;
- débits moyens et de pointe, durée de fonctionnement envisagée ;
- température du rejet et impact sur le milieu ;
- compatibilité des caractéristiques physico-chimiques de l'eau rejetée avec celles du cours d'eau (classe de qualité du cours d'eau) ;
- éventuellement, accord du service chargé de la gestion du cours d'eau pour le rejet de produits de traitement de l'eau passant dans les échangeurs et le réseau de surface ;
- débit moyen mensuel du cours d'eau au cours des cinq dernières années.

• Rejets dans le réseau pluvial ou d'eau usée :

- description du schéma de rejet ;
- débits moyens et de pointe, durée de fonctionnement envisagée ;
- température du rejet et impact sur le milieu ;
- nature et caractéristiques du réseau (séparation entre eaux usées et eaux pluviales) ;

- dimensionnement et adaptation du réseau pluvial à l'évacuation supplémentaire, notamment en période d'orages ;
- dimensionnement et adaptation du réseau d'eau usée à l'évacuation supplémentaire ;
- accord du concessionnaire du réseau ou de la municipalité.

• **Réinjection en nappe⁴**

- estimation des débits de réinjection moyens et de pointe, durée de fonctionnement envisagée, nombre d'ouvrages à réaliser ;
- évaluation du risque d'ennoisement du voisinage en zone urbaine, en particulier lorsque des bâtiments voisins comprennent plusieurs niveaux de sous-sol ;
- impact sur la qualité en cas de traitement de l'eau par des produits anticorrosion et des produits bactéricides, (produits autorisés pour l'eau potable) ;
- mesures prises pour éviter un développement bactérien dans le réseau de surface avant réinjection (en particulier, élimination de point bas) ;
- température de rejet et impact thermique sur la nappe et sur les captages environnants ;
- distance entre forages d'exhaure et forages de réinjection ;
- orientation de l'axe du doublet par rapport à l'écoulement général de la nappe.

Compte tenu de l'importance du dossier il pourra être exigé des données complémentaires permettant une gestion thermique des ressources :

- taux de recyclage ;
- évolution et percée du front thermique ;
- temps de percée ;
- évolution thermique au forage d'exhaure ;
- durée de vie de l'installation ;
- impact du doublet sur les pressions du réservoir ;
- impact du doublet sur les températures : panache thermique ;
- évolution thermique du panache ;
- dépassement d'un seuil de variation thermique tolérée ;
- emprise de la zone perturbée ;
- régénération thermique du réservoir.

Consignes et contrats de suivi d'exploitation

- suivi du fonctionnement et contrôle des performances de l'installation ;

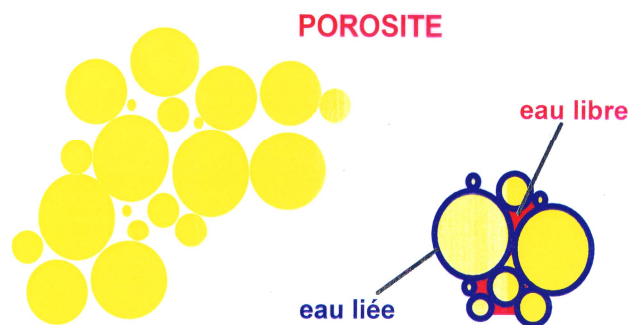
⁴ Voir notamment le rapport BRGM 82 SGN 023

- suivis et contrôles de la nappe (productivité, injectivité, géochimie, température) et des forages (contrôle des tubages et des crépines) ;
- surveillance de l'absence d'impact sur la stabilité du bâti ;
- opérations d'entretien et de maintenance de l'installation sous-sol ;
- protocole technique, financement, forme contractuelle, métrologie.

Fiche 9 - Notions d'hydrogéologie et aptitude des nappes (0 - 100 m) à alimenter une PAC

La nature lithologique des aquifères

Les grès, les calcaires et la craie sont des roches massives et poreuses qui présentent une proportion de vides très variable entre les grains qui forment la roche (porosité d'interstices). Cependant, l'eau y circule principalement dans les fissures, les fractures, les zones altérées et les cavités karstiques de dissolution dans les calcaires.



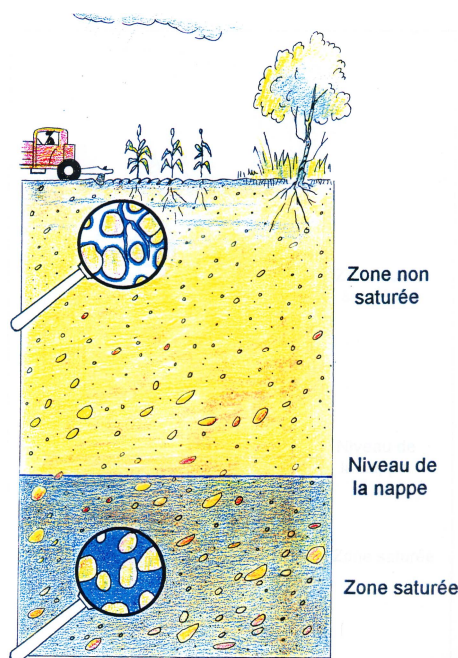
Porosité d'interstice

Les formations géologiques **qui laissent passer l'eau**, notamment les sables et graviers, sont des **roches perméables**.

Les argiles **qui freinent le passage de l'eau** sont considérées **imperméables ou semi-perméables**.

Une formation géologique est dite **aquifère** lorsqu'elle a la **propriété d'emmagasiner et de permettre l'écoulement de l'eau**.

La **zone saturée** d'un aquifère correspond à la zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches.



Formation aquifère : zone saturée et non saturée.

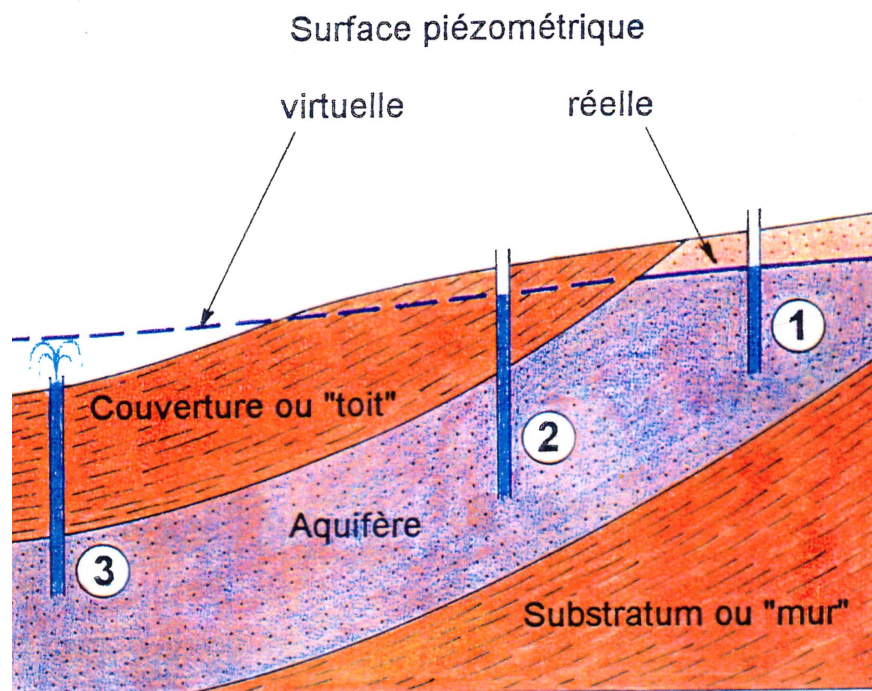
Une **nappe d'eau souterraine** correspond à l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.

La **quantité** d'eau qu'un aquifère emmagasine (réserve) et le **débit** qu'il écoule dépendent de ses **dimensions** (étendue, volume), de la **porosité** et de la **perméabilité** des roches qui le constituent.

Il est possible de caractériser les aquifères par des paramètres hydrogéologiques qui leur sont propres.

Les nappes d'eau souterraine, leur piézométrie, leur écoulement

Selon les conditions morphologiques et géologiques, une nappe peut être successivement **libre** et **captive**.



- En ① la nappe est libre,
- en ② elle est captive,
- en ③ elle est captive et artésienne (jaillissante)

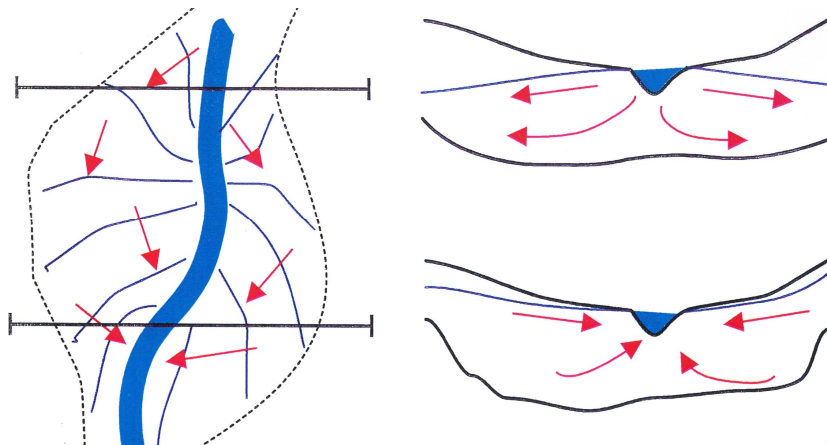
Une **nappe libre**, recélée par une couche perméable partiellement saturée d'eau et reposant sur une couche imperméable, est surmontée d'une zone non saturée au sein de la roche aquifère. Elle est souvent le premier aquifère rencontré depuis la surface et n'est pas mise en charge sous un recouvrement imperméable. Le **niveau piézométrique** correspond à la limite entre la **zone non saturée** et la **zone saturée** en eau au sein de la roche aquifère. L'ensemble des altitudes des niveaux d'eau mesurés dans les puits ou les forages, représente la **surface piézométrique** de la nappe. Cette surface libre varie essentiellement en fonction des fluctuations climatiques, notamment saisonnières. Elle varie aussi localement, en fonction des pompages effectués et des éventuelles réinjections en nappe. Les pluies d'hiver permettent la recharge de la nappe lors des hautes eaux. En règle générale, à la fin de l'été, la nappe s'est en partie vidangée au droit de ses exutoires, sources et rivières. Les **cartes de la surface piézométrique** apportent un grand nombre d'informations, principalement le **sens d'écoulement** de la nappe, **les axes de drainage** et participent à l'identification des zones favorables à l'implantation d'un captage.

Dans une **nappe captive** l'eau souterraine est emprisonnée dans la formation géologique perméable entre deux formations géologiques imperméables. C'est le cas des couches de roches perméables profondes situées sous les nappes libres des

bassins sédimentaires. Mais on peut également observer des nappes captives à quelques dizaines de mètres de profondeur. L'aquifère est **mis en pression** par la **charge hydraulique** de l'eau qu'il contient. La charge hydraulique est déterminée par la cote piézométrique dans les parties libres de l'aquifère captif. Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, l'eau remonte brusquement dans le forage. Le niveau de l'eau stabilisé dans le forage représente le niveau piézométrique. Si le niveau piézométrique se situe au-dessus de la surface du sol, l'eau jaillit naturellement. On dit que le **forage est artésien**. La surface piézométrique d'une nappe captive n'indique pas la profondeur de l'eau sous la surface du sol mais la charge hydraulique dans les terrains aquifères. Elle informe sur la profondeur à partir de laquelle on peut pomper l'eau dans un forage.

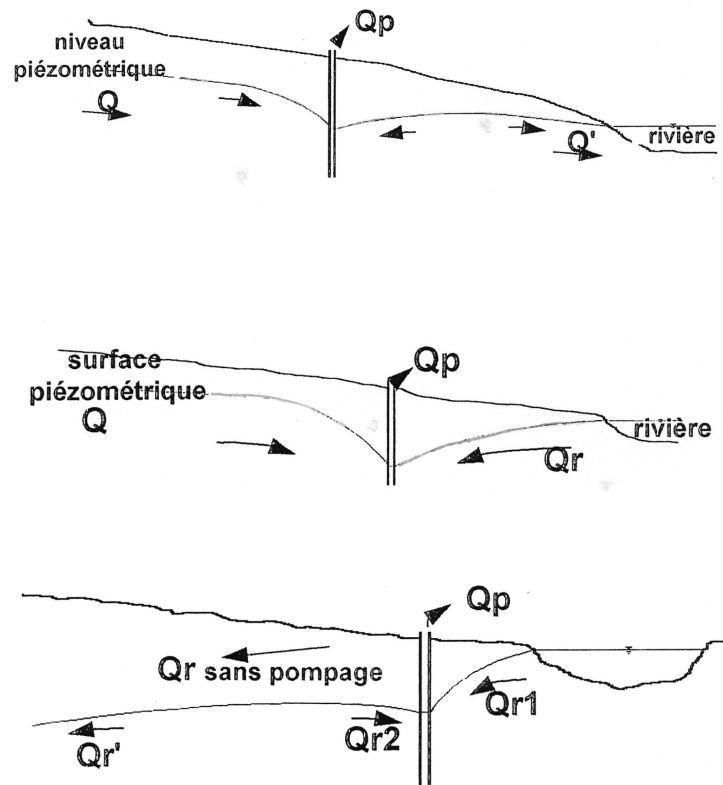
Le **gradient de charge hydraulique (i)** est la différence de niveau piézométrique entre deux points de la surface piézométrique, par unité de longueur mesurée le long d'une ligne de courant. Il est assimilable à la **pente de la surface piézométrique**.

Les **aquifères peu profonds des alluvions** des moyennes et grandes vallées alluviales **communiquent** en général avec les **cours d'eau**. Le **sens d'écoulement** de l'eau souterraine dépend de la position relative de la surface piézométrique par rapport au niveau de l'eau dans la rivière. La rivière peut **drainer la nappe** et lui servir d'exutoire. La rivière peut **alimenter la nappe**, notamment en période de crue. En un même point, ces sens d'écoulement peuvent varier dans le temps en relation avec les saisons et les pompages en nappe.



Relations nappe - rivière

Un pompage dans la nappe induit un rabattement du niveau piézométrique. S'il est situé à proximité d'une rivière, il peut provoquer ou renforcer les apports d'eau à la nappe depuis le cours d'eau. On parle alors de **recharge induite** de la nappe considérée. Le débit pompé est un **mélange d'eau souterraine et d'eau de surface**.



Relations nappe - rivière - forage

Les nappes alluviales peuvent jouer un rôle de **relais hydraulique** entre un horizon aquifère sous-jacent et le cours d'eau.

Les aquifères karstiques

Les karsts se développent au sein des roches carbonatées (calcaires). Ils constituent un réseau souterrain de conduits plus ou moins développé et profond. Les aquifères karstiques sont caractérisés par de **très forts contrastes de perméabilité** entre la matrice calcaire très peu perméable et les vides qui ont été générés en son sein. Ils sont le **siège d'écoulements rapides** (plusieurs mètres à quelques centaines de mètres par heure), dont la vitesse varie très significativement entre les périodes d'étiage et de crue. Les **débits des forages sont très hétérogènes** : nuls ou négligeables dans la roche massive ou considérables dans les drains bien alimentés.

Les aquifères multicouches

En dépit de leur faible perméabilité, les épontes (formations du toit et/ou du substratum) permettent des échanges avec l'aquifère sus-jacent ou sous-jacent. Ces échanges peuvent atteindre des débits significatifs en raison des surfaces mises en jeu. Un ensemble de couches superposées qui contiennent des nappes

intercommunicantes par **drainance** à travers des couches plus ou moins épaisses et plus ou moins perméables constituent un système aquifère multicouche.

Le coefficient d'emmagasinement (S), en nappe captive

Le **coefficient d'emmagasinement** (sans dimension) exprime le **rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface de l'aquifère, à la variation de charge hydraulique correspondante**. Il s'agit d'un indicateur de la capacité de stockage. Il est mesuré sur le terrain par pompage d'essai.

Au sein d'un aquifère captif, ce rapport est lié à la compressibilité (ou expansibilité) de l'eau et du milieu aquifère lui-même (squelette rocheux), ainsi qu'à la puissance de la couche aquifère.

En nappe libre, le coefficient d'emmagasinement (S) équivaut à la **porosité efficace**.

Les compressibilités de la roche et de l'eau étant relativement faibles (S compris entre 10^{-3} et 10^{-6}) par rapport aux valeurs courantes de porosité efficace, pour une même baisse de pression, le volume d'eau libéré par un aquifère libre est de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui libéré par un aquifère captif.

La porosité efficace, en nappe libre

Une partie de l'eau contenue au sein des pores, celle qui se situe à proximité des grains de roche, est liée à ceux-ci par les forces de capillarité. Elle ne peut donc pas s'écouler au sein de la roche. Le volume au sein duquel l'eau souterraine peut s'écouler est appelé **porosité efficace**.

Elle est déterminée en laboratoire sur un échantillon saturé d'eau et correspond au **pourcentage d'eau gravitaire libérée par égouttage complet par rapport au volume total de l'échantillon**. Elle est aussi accessible sur le terrain, par pompage d'essai.

Plus la taille des grains constitutifs de la roche est petite, plus ses pores sont eux-mêmes petits donc plus la part de l'eau liée est importante. La porosité efficace diminue donc avec le diamètre des grains et lorsque la granulométrie est variée. Elle dépend des formes d'arrangement des grains et de leur surface spécifique. Elle diminue avec la profondeur. La cimentation de la roche (remplissage d'une partie de la porosité par un ciment minéral qui lie les grains entre eux) contribue également à diminuer la porosité efficace.

Les ordres de grandeur de la porosité efficace sont :

Gravier	25 %
Sable, sable et gravier	20 %
Sable fin, grès	10 %
Argiles et graviers, graviers cimentés	5 %
Argile, lave	3 %
Craie	2 à 5 %

La perméabilité (K)

Seule l'eau contenue au sein des pores reliés entre eux peut s'écouler au sein de la roche. La perméabilité est le paramètre qui caractérise et quantifie, à l'échelle macroscopique, cette **aptitude d'un milieu poreux à se laisser traverser par un fluide**.

La loi de Darcy s'exprime sous la forme d'une équation : $Q = K s (H1 - H2)/L$

Q (m³/s) : débit d'eau pouvant transiter au sein d'un milieu poreux

K (m/s) : perméabilité du milieu poreux

s (m²) : la section totale offerte à l'écoulement

(H1 – H2)/L : gradient de charge hydraulique (i)

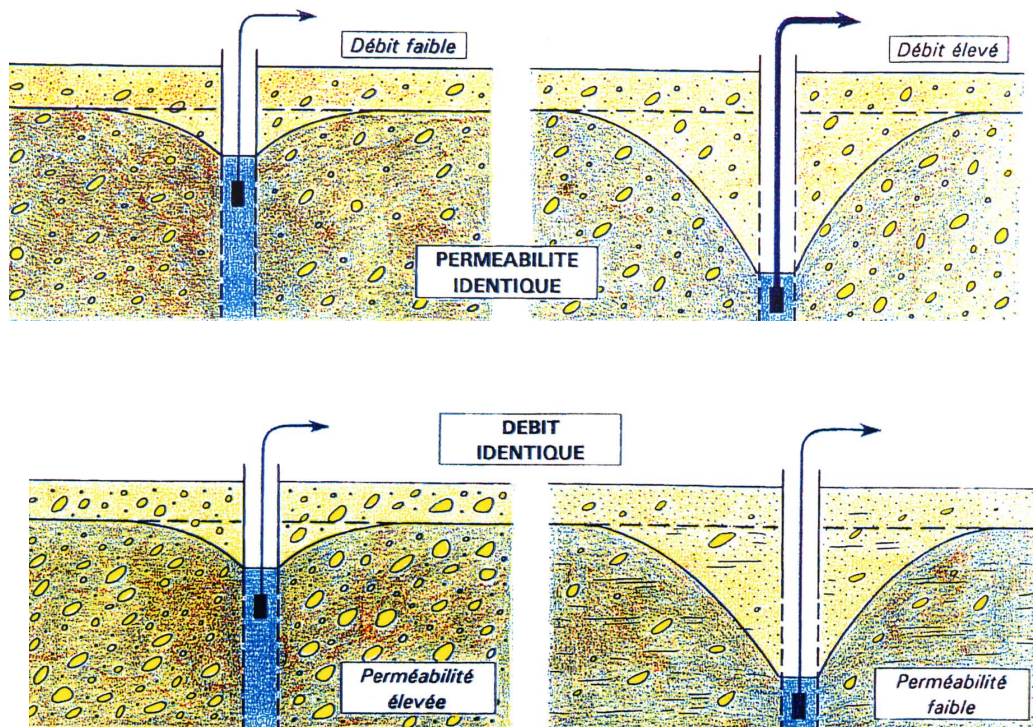
Le coefficient de perméabilité a la dimension d'une vitesse et s'exprime en m/s.

On distingue la perméabilité d'interstices, de fissures, de chenaux ou de conduits. Les valeurs de perméabilité varient de quelques millimètres par seconde pour les réservoirs perméables à 10 000 fois plus faibles pour les formations imperméables. Exprimées en puissance de dix, ces valeurs s'échelonnent de 10¹ à 1.10⁻¹¹ m/s.

Formation	Coefficient de perméabilité	Perméabilité
perméable	10 ¹ et 10 ⁻⁴ m/s	très bonne
semi-perméable	1.10 ⁻⁴ et 1.10 ⁻⁹ m/s	mauvaise à très mauvaise
imperméable	égal ou inférieur à 1.10 ⁻⁹ m/s	nulle

La perméabilité d'une roche est grossièrement proportionnelle à la taille et à la fonction de distribution des grains qui la composent ; elle est donc liée à sa granulométrie. On peut classer les roches en fonction de leur perméabilité :

	10 ⁻²	10 ⁻⁵	10 ⁻⁹	10 ⁻¹³
Graviers	Sables purs	Sables très fins	Argiles homogènes	
Gravillons dépourvus d'éléments fins	Sables et graviers dépourvus d'éléments fins	Silts et mélanges sables et argiles		
		Grès		



Relations perméabilité, débit, rabattement dans un captage

La vitesse d'écoulement

La vitesse d'écoulement de l'eau dans une nappe peut être calculée à partir de la formule de Darcy :

$$V_D = K i \text{ avec :}$$

V_D = « vitesse de Darcy » (en m/s)

K = perméabilité de l'aquifère (en m/s)

i = gradient de charge hydraulique

La « vitesse de Darcy » ne doit pas être confondue avec la **vitesse réelle de l'eau**. En effet l'eau ne s'écoule qu'au sein de la porosité et des fissures de la roche et non au sein de l'ensemble de la section du milieu poreux et fissuré. La vitesse réelle de l'eau dépend aussi de la proportion des pores et des fissures de la roche.

$$V_r = V_D / \Omega$$

V_r : vitesse réelle de l'eau = $K i /$ porosité efficace du milieu

Ω : porosité efficace du milieu

Les vitesses des nappes souterraines sont variées, mais toujours lentes en comparaison de celles des rivières. Pour parcourir 1 km, l'eau souterraine peut mettre quelques mois ou quelques siècles.

La vitesse réelle permet d'appréhender le déplacement des **panaches thermiques** après réinjection. Par exemple, le panache d'eau « froide » aura tendance à s'éloigner plus vite du puits de pompage que la perméabilité de l'aquifère et le gradient de la nappe sont forts et que la porosité de l'aquifère est faible.

La transmissivité (T)

La transmissivité est le paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu, mesurée selon une direction orthogonale à celle de l'écoulement, et par unité de gradient hydraulique.

La transmissivité est égale au produit de la perméabilité moyenne de la tranche saturée de l'aquifère par son épaisseur mouillée. Elle s'exprime en m^2/s .

La transmissivité est une caractéristique essentielle qui **permet de prévoir les débits que l'on peut capter dans un forage**. Ce paramètre est très couramment utilisé par les hydrogéologues car il peut être facilement déduit de l'interprétation de pompages d'essai.

Sur les cartes hydrogéologiques, les plages d'égale transmissivité sont déduites par interpolation soit entre les transmissivités calculées lors des tests de pompage réalisés sur les captages répertoriés, soit assimilées au rapport débit/rabattement en admettant que les pertes de charge dues au filtre et à la crépine sont négligeables.

L'épaisseur efficace (h)

Elle est déduite avec précision à la suite de **tests au micromoulinet**, ce qui est rarement le cas. Au niveau d'une étude de préfaisabilité, faute de mieux, cette épaisseur est estimée égale à l'épaisseur totale de l'aquifère moins l'épaisseur des intercalations argileuses. Eventuellement, la réalisation d'une diagraphie gamma-ray dans le forage permet d'apprécier le pourcentage relatif des passées argileuses de l'aquifère.

La diffusivité (T/S)

La diffusivité est égale au quotient de la transmissivité (T) par le coefficient d'emmagasinement (S). Elle s'exprime en m^2/s . Elle caractérise la rapidité de la réaction d'un aquifère à une impulsion représentée par exemple, par un pompage, une injection, ou la variation saisonnière de la recharge.

La productivité

La productivité d'un aquifère est indiquée par le débit exploitable pour un rabattement donné. Elle dépend de la qualité du réservoir (volume, étendue), de son aptitude à s'écouler et de sa réalimentation naturelle. C'est le premier paramètre à prendre en compte au stade initial d'un projet de chauffage par PAC sur nappe.

La température

Les nappes d'eau souterraines peu profondes contiennent de l'énergie thermique dont l'origine est solaire et terrestre. Au-delà de 20 à 50 m de profondeur, les variations thermiques d'origine solaire deviennent imperceptibles et la température croît graduellement sous l'effet du gradient géothermique (en moyenne 3° par 100 m) correspondant aux pertes de chaleur interne du globe terrestre (conductivité thermique).

La température moyenne des eaux des nappes entre 0 et 100 m est voisine de 12 °C. Elle dépasse 14 °C à proximité d'ouvrages d'injection utilisés pour la climatisation d'ateliers ou de bureaux.

L'aptitude des nappes à alimenter une PAC en Ile-de-France

L'aptitude des nappes à alimenter une PAC est appréciée en fonction de leur productivité et suivant des critères qui déterminent le coût des ouvrages : profondeur, dimensionnement plus fort des diamètres de foration et nécessité d'équipements spéciaux.

Dans la tranche de terrains 0 - 100 m, une étude du BRGM⁵ réalisée en 1982 retenait cinq niveaux d'aptitude pour différents sites en Ile-de-France, plus ou moins favorables à l'implantation des PAC sur nappe.

- **Très favorable** : débit supérieur à 50 m³/h avec forage de moins de 50 m dans un aquifère calcaire ou crayeux ne nécessitant pas d'équipements spéciaux, le niveau de la nappe se trouvant à moins de 10 m sous le sol.
- **Favorable** : débit supérieur à 50 m³/h avec forage de plus de 50 m, équipements spéciaux et niveau de la nappe à plus de 10 m sous le sol.
- **Moyennement favorable** : débit compris entre 10 et 50 m³/h avec forages de moins de 50 m dans un aquifère calcaire ou crayeux ne nécessitant pas d'équipements spéciaux, le niveau de la nappe se trouvant à moins de 10 m sous le sol.
- **Faiblement favorable** : débit compris entre 10 et 50 m³/h avec forages de plus de 50 m, équipements spéciaux et niveau de la nappe à plus de 10 m sous le sol.
- **Peu favorable** : débit inférieur à 10 m³/h.

Au stade initial du **diagnostic préliminaire**, ces niveaux d'aptitude concernent exclusivement la ressource. Ils constituent les réponses aux questions que se posent les personnes désireuses d'installer une PAC sur nappe. Si les caractéristiques globales semblent convenir, l'étape suivante sera celle de **l'étude de faisabilité**.

Néanmoins cette classification ne préjuge pas des besoins ponctuels et ne doit pas être assimilée à une échelle de valeur d'opérations potentielles. Ainsi une « bonne opération PAC » peut être réalisée dans un contexte de ressources aquifères « peu favorables » pour peu que ses besoins soient satisfaits.

⁵ Rapport BRGM 82 SGN 321 IDF Ausseur JY, Campinchi J. et Sauty JP « Aptitude des nappes d'eau souterraines de 0 à 100 m pour l'installation des pompes à chaleur en région Ile-de-France. Aspects hydrothermique et économique au niveau de la faisabilité »

Fiche 10 - La ressource en eau souterraine en Ile-de-France entre 0 et 100 m de profondeur

Le sous-sol de la région Ile-de-France entre 0 et 100 m de profondeur, recèle 5 entités aquifères calcaires et 3 entités aquifères à dominante sableuse. Ce sont successivement :

- Les alluvions quaternaires des vallées de la Seine, de la Marne, de l'Yonne, de l'Oise et du Loing.
- Les formations de l'Oligocène (Stampien) : Calcaires de Beauce, Sables de Fontainebleau, Calcaires de Brie.
- Les formations de l'Eocène supérieur, moyen et inférieur : Calcaires de Champigny, Calcaires du Lutétien et Sables de l'Yprésien.
- La Craie du Sénonien.

Le tableau ci-après, présente de manière schématique le cadre géologique régional des entités aquifères.

Stratigraphie	Désignation		Lithologie	Epaisseur moyenne (m)	Hydrogéologie
Quaternaire	Alluvions des grandes vallées		Sable et argile	5	Nappes alluviales
Oligocène (Stampien)	Calcaire de Beauce		Calcaire	20	Aquifère
	Sable de Fontainebleau		Sable	40	Aquifère
	Calcaires et argiles de Brie		Calcaires et argiles	5	Aquifère
	Marnes vertes et supragypseuses		Marnes	10	Imperméable
Eocène supérieur (Bartonien)	Masses et Marnes du gypse	Calcaires de Champigny s.litho.	Marnes et gypse ou calcaire	50	Aquifère
		Calcaire et Marnes de St Ouen	Calcaire et marnes	15	Partiellement aquifère
	Sable de Beauchamp		Sable et argile	4	Partiellement aquifère
	Eocène moyen (Lutétien)	Marnes et Caillasses Calcaire grossier		Marnes, calcaires, gypse	30
Eocène inférieur (Yprésien)	Sable de Cuise		Sable et argile	30 à 40	Aquifère
	Fausse glaise		Argile	10	Imperméable
	Sable d'Auteuil		Sable et argile	5	Aquifère
	Argile plastique Arkose de Breuillet		Argile	15	Imperméable
	Conglomérat de Meudon		Galets ou argile	5	Partiellement aquifère
Paléocène (Montien)	Marne		Marne	5	Imperméable
Crétacé (Sénonien)	Craie		Calcaire	> 30	Aquifère

Les aquifères de l'Oligocène (Stampien) : Calcaire de Beauce, Sables de Fontainebleau, Calcaires de Brie sont présents dans l'Essonne, le Sud des Yvelines et de la Seine-et-Marne.

L'aquifère de l'Eocène supérieur (Bartonien) : Calcaires de Champigny s.l. est présent dans les arrondissements de Melun et de Provins et dans l'Essonne à l'est de la Juine.

Les aquifères de l'Eocène inférieur : Calcaire du Lutétien et Sables de l'Yprésien, sont présents à Paris et dans sa banlieue, dans le Val d'Oise, les Yvelines et le Nord de la Seine-et-Marne et de l'Essonne.

La Craie du Sénonien est présente au sud-est de la région, dans la vallée de la Seine à l'ouest de Paris, dans la haute vallée de l'Oise et dans les vallées de la Remarde, de la Mauldre et de l'Aubette.

Enfin, les alluvions quaternaires occupent essentiellement les vallées de la Seine, de la Marne, de l'Oise, de l'Yonne et du Loing.

Les alluvions, les Sables de Fontainebleau et les Sables de l'Yprésien sont des aquifères sableux à perméabilité d'interstice. Les autres : Calcaire de Beauce, Calcaire de Brie, Calcaire de Champigny s.l., Calcaire du Lutétien et Craie du Sénonien sont des réservoirs à perméabilité de fissures.

Suivant la tectonique du Bassin parisien, les changements de faciès de ces horizons, la présence possible d'intercalations argileuses et la topographie, les différents aquifères peuvent être superficiels ou superposés. La superposition d'aquifères distincts peut être appréhendée par l'analyse des cartes disponibles et au moyen de coupes hydrogéologiques qui couvrent l'ensemble de la région. De nombreux autres renseignements peuvent être déduits des documents cartographiques régionaux : nature lithologique et profondeur des aquifères, épaisseur efficace, perméabilité, productivité, transmissivité, piézométrie, direction d'écoulement, gradient hydraulique, température et qualité physico-chimique des eaux souterraines.

La productivité varie entre 50 et 200 m³/h dans une grande partie de la vallée de la Seine et de ses affluents.

Dans les vallées de la Seine et de ses affluents, les plateaux de Brie au nord et à l'est de Melun, sur la Bière, sur une grande partie du Gâtinais à l'est de Nemours, en limite ouest du département de l'Essonne et sud-ouest de celui des Yvelines on trouve des aquifères intéressants à moins de 50 m de profondeur. Les captages à plus de 50 m se trouveront à Paris sur les plateaux du Val d'Oise, de la Seine-Saint-Denis, des Hauts-de-Seine, sur ceux de l'arrondissement de Meaux de part et d'autre de la Marne, ainsi qu'autour de l'Yvette et au sud du département de l'Essonne.

La température moyenne des eaux des nappes entre 0 et 100 m est voisine de 12 °C. Dans la vallée amont de la Seine la température est comprise entre 10 et 12 °C. Elle dépasse 14 °C à proximité d'ouvrages d'injection utilisés pour la climatisation d'ateliers ou de bureaux. A Paris, compte tenu de l'importance des rejets en nappe, pratiquement toutes les eaux ont des températures supérieures à 14 °C, pouvant parfois atteindre 16 ou 17 voire 18 °C. Dans ces conditions, la solution de chauffage par PAC sur nappe peut être avantageuse.

Les eaux des nappes de la région sont bicarbonatées calciques avec parfois des duretés supérieures à 30°. C'est le cas des eaux des nappes alluviales, des Calcaires de Brie, des Calcaires de Champigny, de l'Eocène inférieur et de la Craie. Elles sont incrustantes surtout à Paris et vers Meaux. La nappe des Sables de Fontainebleau est

en général beaucoup moins minéralisée. La nappe du Lutétien et de l'Yprésien contient souvent en plus, des teneurs en sulfates et en fer liées au gypse, aux lignites et à la pyrite. La présence d'H₂S augmente les risques de corrosion des tubages métalliques. Dans les alluvions, les eaux recèlent parfois un excès de fer ou de manganèse lié à la présence d'intercalations tourbeuses.

L'élévation de la température des eaux et un excès de fer peuvent entraîner une prolifération de ferro-bactéries qui colmatent les crépines des forages ou attaquent les tubages. Ces phénomènes apparaissent aussi à proximité des sablières alluviales.

Fiche 11 - Réalisation des forages

Les forages - Généralités

Dans une installation de climatisation sur nappe, **les forages sont des organes essentiels du dispositif** dans la mesure où ils permettent de fournir et de rejeter (dans le cas d'une réinjection en nappe) l'eau nécessaire aux échanges thermiques.

Ce sont des ouvrages d'art, dont la conception et la réalisation doivent être parfaitement maîtrisées par des opérateurs compétents. La mise à disposition d'eau souterraine dans des conditions appropriées résulte à la fois des qualités intrinsèques de la nappe, de l'ouvrage de prélèvement et, le cas échéant, de l'ouvrage de réinjection, de leur complétion, de leur développement et de leur équipement. A ce titre **l'ingénierie sous-sol** constitue le fondement du fonctionnement de l'installation.

La réalisation d'un forage va obligatoirement perturber l'équilibre naturel parfois fragile, qui existe entre les milieux traversés. Un forage **mal exécuté**, un forage **mal entretenu** ou un forage **abandonné sans précaution** est un **vecteur potentiel de pollution** par **infiltrations depuis la surface** ou par la **mise en communication de différents niveaux aquifères** naturellement isolés par des couches imperméables.

En vue de préserver la qualité des eaux souterraines, les pouvoirs publics réalisent des actions de sensibilisation et des contrôles. Certains foreurs sont engagés dans une charte de qualité visant à livrer des forages correctement isolés.

Il est essentiel d'assurer un suivi hydrogéologique, notamment lors de forages profonds ou de programmes conséquents nécessitant des débits importants.

Contrôles préalables du chantier, du matériel et des fournitures

Le contrôle préalable vise à éviter les contestations ultérieures ou l'arrêt du chantier pendant les travaux. Il s'agit de s'assurer avec le responsable des travaux des conditions suivantes :

- conformité du dossier administratif : récépissé de déclaration « loi sur l'eau » ou arrêté d'autorisation, envoi en préfecture de la déclaration d'ouverture de chantier, déclaration « code minier » ;
- pour le cas où le forage se trouve sur le domaine public, retour des DICT (Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux) ;
- implantation précise du forage ;
- bonne desserte du chantier : plate-forme, accès, eau, électricité... ;
- agencement des installations et organisation du chantier : accès et stationnement des véhicules, emplacement des réserves de carburant et de lubrifiants, stockage d'acides, boues et produits chimiques éventuels ;

- respect de l'environnement et du voisinage : nuisances sonores, bassin de décantation de l'eau du forage ou cuve de rétention en cas d'adjuvants de foration, cuve de rétention ou merlon de protection du sol contre les fuites d'hydrocarbures ;
- respect des règles de sécurité, Plan Particulier de Sécurité et Protection de la Santé (PPSPS), coordination sécurité avec les autres intervenants en liaison avec le coordinateur sécurité du chantier ;
- conformité des matériels : type d'équipement, tiges de forage, outils ;
- conformité des fournitures : normes standard des tubages en matériau résistant à l'écrasement et compatible avec la qualité chimique des eaux (parfois acides ou salées) pour limiter le risque de corrosion, y compris de corrosion galvanique, crépine (nature, type, diamètre, épaisseur, ouverture), gravier (nature et granulométrie) pour massif filtrant adaptés au schéma de forage prévu, ciment adapté aux terrains (résistant aux sulfates, par exemple)...

Contrôle de la foration

Lors de la foration, le foreur doit suivre les spécifications techniques établies. Dans les terrains meubles et bouillants, il doit veiller à éviter l'effondrement possible des parois du trou. Il contrôlera régulièrement la bonne verticalité du trou. En cas de pertes totales de fluides de circulation, il évitera l'injection de grandes quantités de boues dans les terrains.

Le superviseur doit valider les modifications apportées aux termes de référence pour surmonter les impondérables, après acceptation par le client des modifications de prix éventuelles.

Le superviseur veillera à ce que les travaux soient bien consignés sur les ***rapports journaliers*** :

- avancements, arrivées d'eau, diamètres, profondeurs, tubages, qualité de la boue, cimentations... ;
- incidents de forage : chutes d'outil, pertes de fluide, éboulements... ;
- pompages d'essai ;
- travaux d'abandon, le cas échéant.

On veillera à la tenue des terrains supérieurs instables ou contenant des niveaux aquifères, au moyen de tubages dont l'espace annulaire doit être cimenté. A chaque diamètre de forage correspond un diamètre de tubage obéissant aux règles de l'art et réciproquement.

Échantillonnage des terrains traversés, coupe géologique, prélèvements pour analyses granulométriques, prélèvements pour analyses physico-chimiques et bactériologiques de l'eau

Pendant toute la durée de la foration, l'échantillonnage des terrains sera effectué par le foreur suivant les consignes données par l'hydrogéologue. En principe, le prélèvement de déblais sera effectué tous les mètres forés et à chaque changement de terrain. Pour

l'établissement d'une **coupe géologique** précise, la détermination de la nature des formations sera assurée par le géologue au moyen des échantillons recueillis.

Au niveau de l'aquifère qui constitue l'objectif et si celui-ci est constitué de matériaux meubles (sables, graviers), une quantité plus importante de déblais (minimum 1 kg) sera prélevée pour les besoins **d'analyses granulométriques** qui confirmeront le choix du massif de gravier filtrant et le choix de la crépine.

En fin de pompage d'essai, de l'eau sera prélevée pour analyse de ses **caractéristiques physico-chimiques**. Le nettoyage du forage devra être suffisant pour éliminer toute trace de produit chimique introduit dans le forage (si par exemple, de l'acide chlorhydrique est utilisé et n'a pas été totalement éliminé, l'analyse présentera des anomalies en chlorures). Le prélèvement devra permettre également des analyses bactériologiques (bactéries sulfato-réductrices, ferrobactéries, notamment, responsables de phénomènes de corrosion-dépôt).

Dans la mesure du possible, il est recommandé de faire exécuter l'analyse de certains paramètres sur place (paramètres dits non conservatifs, comme pH, Eh (potentiel d'oxydo-réduction), conductivité, salinité totale, teneurs en fer dissous (filtré à 0,45 µm) et total (non filtré), teneur en oxygène dissous.

Choix des boues de forage

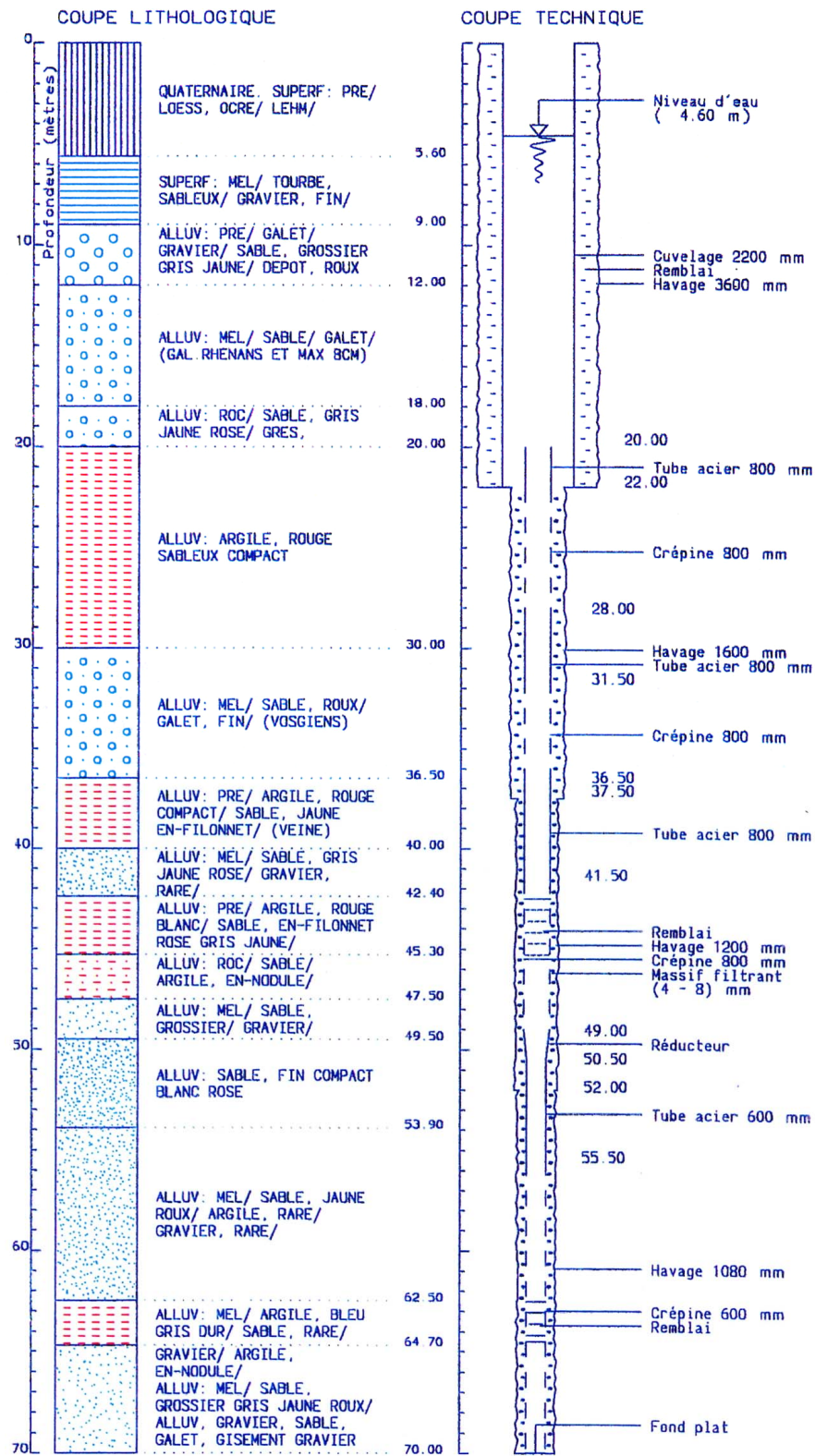
Les **forages à la boue** bentonitique présentent le **risque de colmatage** plus ou moins important du réservoir, notamment en cas de pertes de circulation, ce qui implique un traitement chimique et souvent mécanique du réservoir. L'utilisation de ces boues suppose de bien maîtriser les dosages en fonction des terrains et de l'avancement de l'ouvrage et si nécessaire, de maîtriser les techniques de décolmatage.

Les boues biodégradables permettent de bonnes vitesses d'avancement mais elles sont chères et parfois responsables d'une **prolifération bactérienne** à l'origine d'une **contamination des eaux** ou des **corrosions** sur les canalisations métalliques. Il est recommandé d'utiliser des produits de boues homologués pour différents types de germes. Cependant, dans certains cas, les boues biodégradables ne permettent pas une tenue suffisante des terrains.

Risques liés aux traitements chimiques et aux rejets

Il est nécessaire d'utiliser des produits connus et adaptés au problème, sous peine d'effet néfaste et irréversible.

Le contrôle doit aussi porter sur la neutralisation totale des produits de traitement avant rejet dans l'environnement. Les consignes de sécurité (port de gants, de lunettes, périmètre de sécurité) doivent être scrupuleusement respectées par le personnel (risques de brûlures, par exemple avec de l'acide chlorhydrique ou du peroxyde d'hydrogène). Lorsque les forages sont réalisés en sous-sol de bâtiment, les consignes sont encore plus strictes et une ventilation efficace doit être prévue.

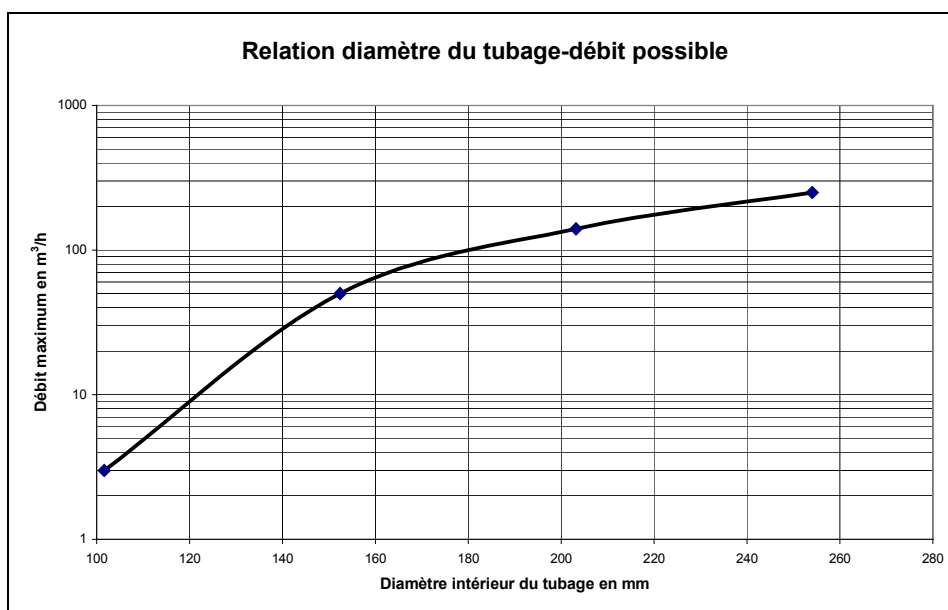


Exemples de coupe géologique et de coupe technique

Tubages et cimentations

Le débit qu'il est possible de prélever ou de réinjecter au moyen d'un forage dépend des caractéristiques hydrodynamiques des terrains, de la manière dont le forage a été construit et des paramètres des pompes. Les caractéristiques des pompes, toute chose étant égale par ailleurs, sont liées au débit et par voie de conséquence au diamètre du tubage. Il est ainsi possible de trouver une **relation approximative entre le diamètre du tubage et le débit d'un forage**.

Le diamètre important d'un tubage d'un forage à petit débit peut traduire une erreur de conception de l'ouvrage ou le désir du propriétaire de l'ouvrage d'augmenter à terme le débit de pompage.

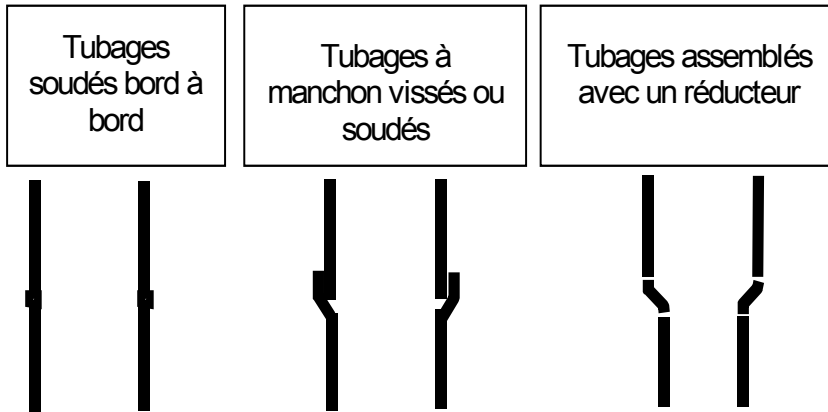


Les matériaux les plus courants des tubages sont l'acier et les chlorures de polyvinyle. **L'acier** est le matériau traditionnel. La qualité des aciers doit respecter des normes liées à leur résistance mécanique. Leurs avantages sont liés à ces qualités mais ils peuvent être corrodés par l'eau. Il est possible d'utiliser des aciers inoxydables en dépit de leur coût élevé. Dans un forage on doit veiller à l'homogénéité de l'acier utilisé pour les tubages et les crépines sous peine de voir apparaître un effet de pile pouvant entraîner des dommages importants au matériel tubulaire et à terme la destruction du forage. Les éléments de tubages et/ou crépines sont soudés ou vissés.

Les chlorures de polyvinyle ou PVC sont très utilisés en raison de leur résistance à la corrosion, du coût plus faible que pour l'acier, de la facilité de manipulation et d'assemblage des éléments de tubage ou de crépine. Les éléments sont vissés ou collés. Cependant, ils ne peuvent pas être utilisés pour les forages profonds. Leur flexibilité exige l'utilisation de centreurs. Au-dessus du niveau de l'eau, le PVC vieillit ; il peut se fendre et son diamètre légèrement diminuer. Les cimentations annulaires peuvent donc ne plus assurer une étanchéité satisfaisante.

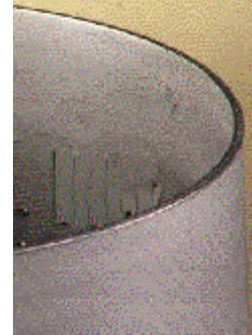
Les tubages sont fabriqués suivant des normes standardisées. La colonne mise en place doit être étanche et résister à l'écrasement, au déboîtement, à la rupture et à la corrosion précoce.

Les tubages en acier sont soudés, vissés ou assemblés au moyen de réducteurs

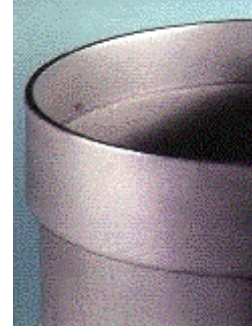


Exemple de jonctions

Tubage soudé bord à bord



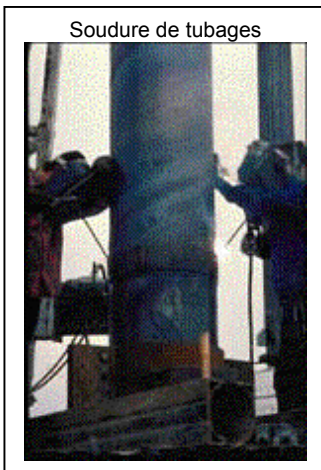
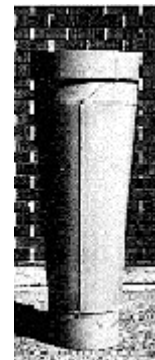
Tubage à manchon soudé



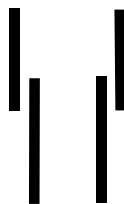
Tubage à manchon fileté



Réducteur



Télescopage à proscrire



Les tubages en PVC possèdent des manchons à coller ou à visser

Fig. 1 - Exemples de jonction des tubages.

Les cimentations sont destinées à rendre les tubages solidaires des terrains encaissants et/ou à prévenir une circulation d'eau dans l'espace annulaire entre le tubage et le terrain. **La cimentation d'un tubage dans un trou est une opération capitale pour la préservation de la qualité des eaux souterraines et la longévité de l'installation.** Elle vise à protéger les niveaux aquifères supérieurs et à **empêcher toute migration d'eau d'un aquifère dans un autre et à partir de la surface.** Elle doit aboutir à l'extrados des tubages à une gaine continue, homogène, adhérente au tubage et aux parois du trou.

Préalablement à la descente des tubes et à leur cimentation, les forages sont alésés en diamètre suffisant et un **contrôle de trou** est effectué si nécessaire. Les tubes doivent **être équipés de centreurs** avec au minimum un à la base et un tous les 10 à 15 m. Les centreurs doivent être disposés de telle sorte qu'ils ne soient pas en face d'excavations dans le terrain. Ils visent à assurer une répartition homogène du ciment dans **l'espace annulaire** entre le trou et le tubage, qui doit être égal ou supérieur à 5 cm.

En **nappe libre peu profonde** (environ quelques dizaines de mètres), un ouvrage à **diamètre unique** peut convenir. Dans ces conditions, la cimentation annulaire sera faite sur toute la hauteur du tube de soutènement avec un **joint étanche** constitué d'argile à la base du ciment, pour éviter l'infiltration du laitier de ciment dans le massif filtrant.

Lorsque la nappe captée est une **nappe captive**, séparée de la précédente par un intercalaire imperméable, on doit éviter la mise en communication des nappes, pendant les travaux et pour la suite, en cas de cimentation défectueuse. Pour cela le forage en diamètre unique est à proscrire. Le forage doit se faire **en autant d'étapes que d'aquifères traversés.** Au cours de la première, les couches supérieures sont traversées jusqu'à la couche de séparation des deux nappes. Après la mise en place du tubage, ancré dans le fond du trou, la cimentation annulaire est faite sur toute la hauteur du tube. La reprise de la foration est réalisée avec un diamètre inférieur. Pour un objectif profond, on répètera les opérations en tenant compte que les différents diamètres de foration et de tubage doivent être correctement choisis en fonction du diamètre nécessaire au débit prévu et donc, pour le puits producteur, du diamètre de la pompe. Par exemple, une pompe immergée de 6" $\frac{3}{4}$ (171,45 mm) susceptible de fournir 100 m³/h nécessitera un tubage d'au moins 200 mm. Une pompe immergée de 8" $\frac{1}{2}$ (215,9 mm) susceptible de fournir 200 m³/h nécessitera un tubage d'au moins 9" $\frac{5}{8}$ (244,5 mm). Les plus petites pompes immergées ont un diamètre de 95 mm, mais elles ne débitent que quelques mètres cubes.

La cimentation fait appel à des **calculs de volumes** à combler et de **dosages adaptés** (choix du type de ciment et additifs) pour la préparation du **laitier de ciment** dont la **densité** (1,8 en général) et la **viscosité** doivent assurer de façon pérenne l'étanchéité à l'extrados du tubage. Il existe plusieurs méthodes de mise en place du laitier de ciment. Les **cimentations gravitaires sont à proscrire.** Les cimentations doivent être mises en place de bas en haut sous pression en injectant le ciment par l'intérieur du forage, qui remonte dans l'annulaire terrain - tubage, jusqu'au jour. On réalisera ces **cimentations par bouchons** avec l'emploi d'un sabot de cimentation placé en pied de tubage et pourvu d'une bille et d'un ressort jouant le rôle de clapet anti-retour. La vitesse de circulation du laitier de ciment dans l'espace annulaire détermine la qualité d'une cimentation. Dans le cas de tubages PVC, la cimentation rapide est à proscrire. Avant la reprise de la foration on respectera le **temps de prise.** Un **test d'étanchéité**

sera effectué. Un contrôle de cimentation par diagraphie CBL (Cement Bond Logging) est conseillé.

Dans le cas de forages très peu profonds (10 à 20 m par exemple) on pourra utiliser une **canne d'injection** placée entre le tubage et le trou, le laitier de ciment sera injecté sous pression par la base et remontera en bouchant l'espace annulaire, au fur et à mesure que la canne d'injection sera remontée.

Dans tous les cas, il est indispensable de contrôler le volume total de laitier mis en place et de le comparer au volume théorique (un écart de plus de 10 % peut signifier la présence d'anomalies).

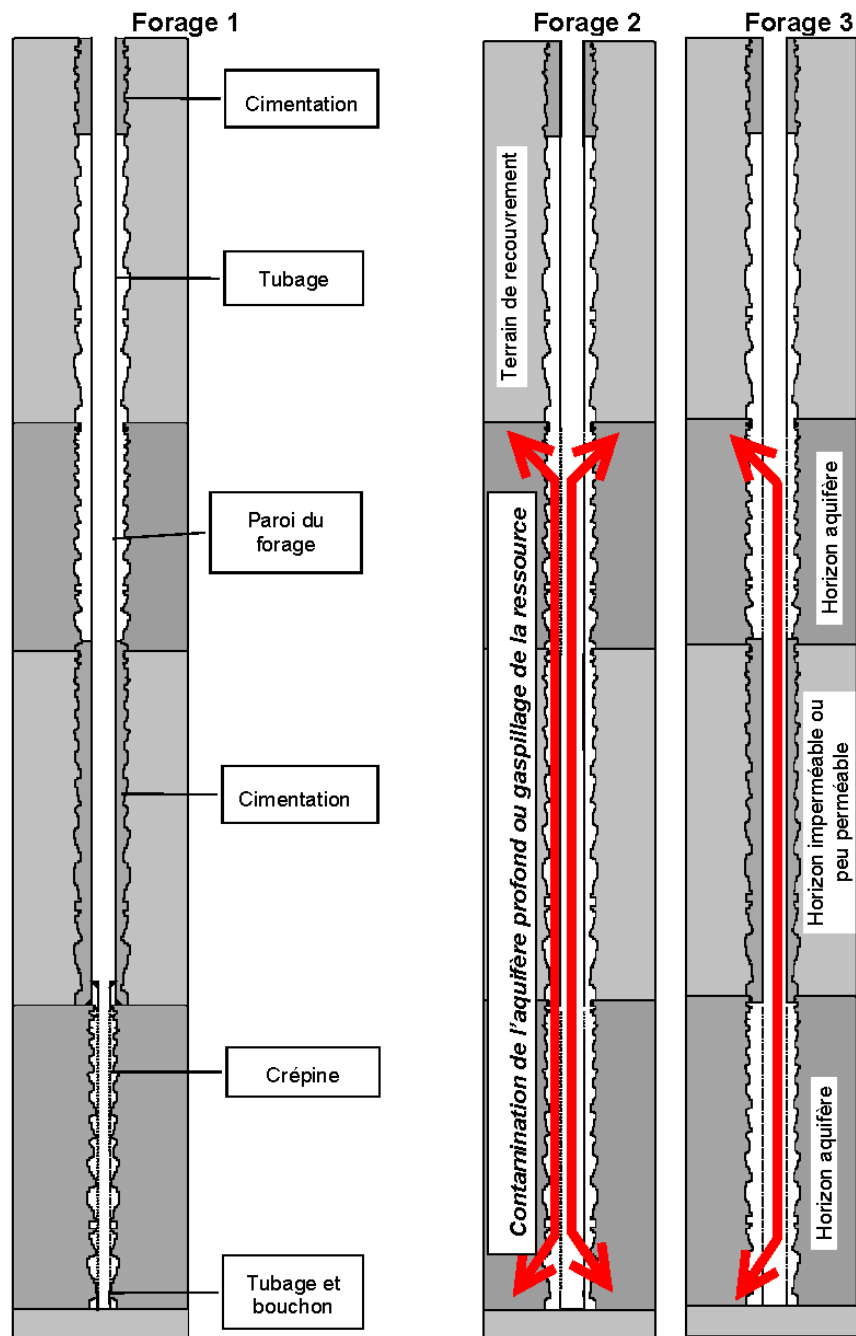


Fig. 2 - Forages traversant deux niveaux aquifères. Seul le forage 1 est correct.

- 1 - Forage correct : la crépine ne capte qu'un seul aquifère ; les deux aquifères sont isolés par une cimentation de l'espace annulaire entre la paroi du trou et le tubage.
- 2 - Forage non correct : la crépine est placée au niveau des deux horizons aquifères et l'absence de cimentation permet la communication entre les deux. L'aquifère supérieur éventuellement contaminé par les pollutions de surface, peut contaminer à son tour l'aquifère inférieur captif et naturellement protégé des pollutions de surface.
- 3 - Forage non correct : la crépine est placée au niveau de deux aquifères et il y a mise en communication des deux aquifères. La cimentation n'est pas conforme car elle ne correspond pas à une réduction de diamètre.

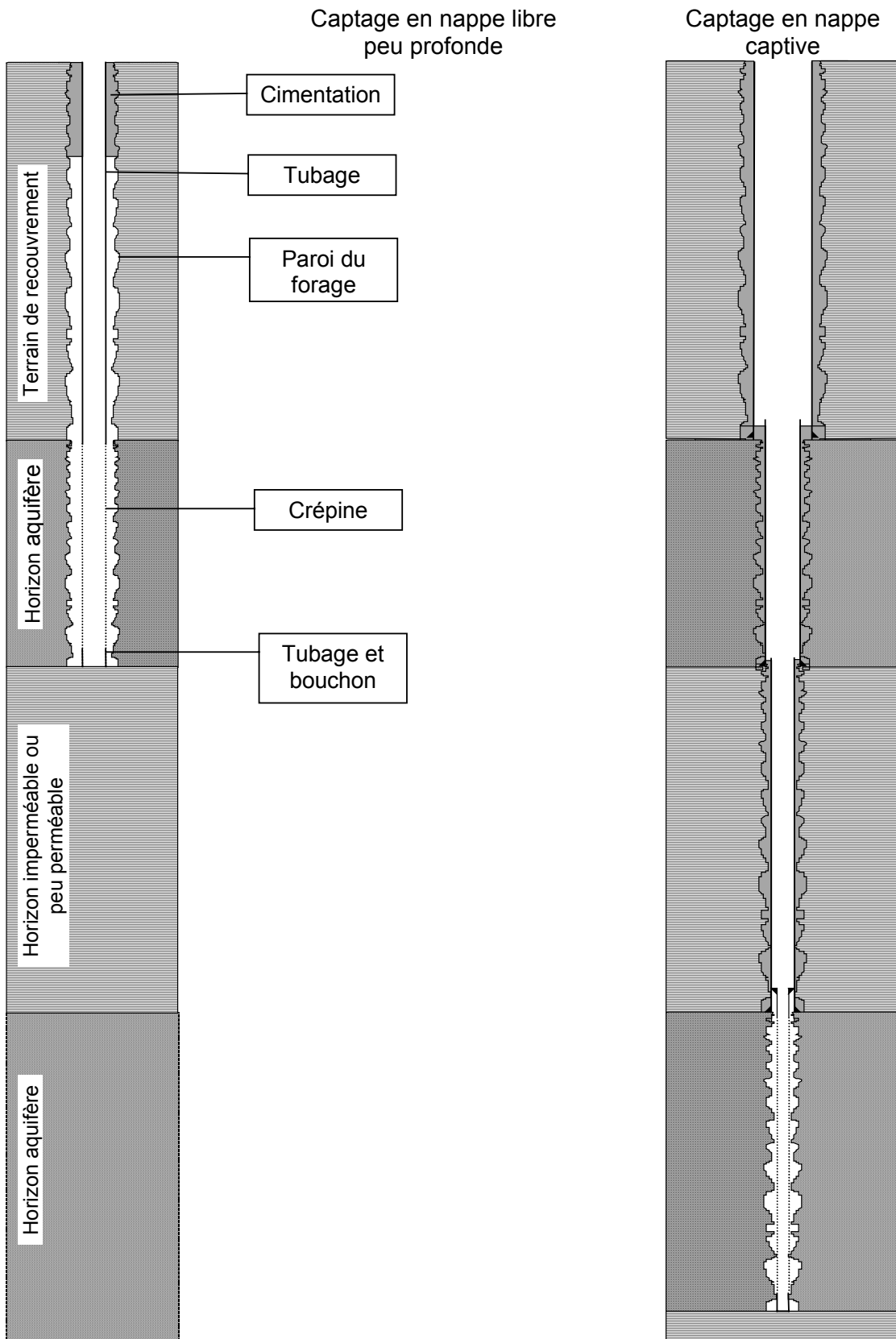
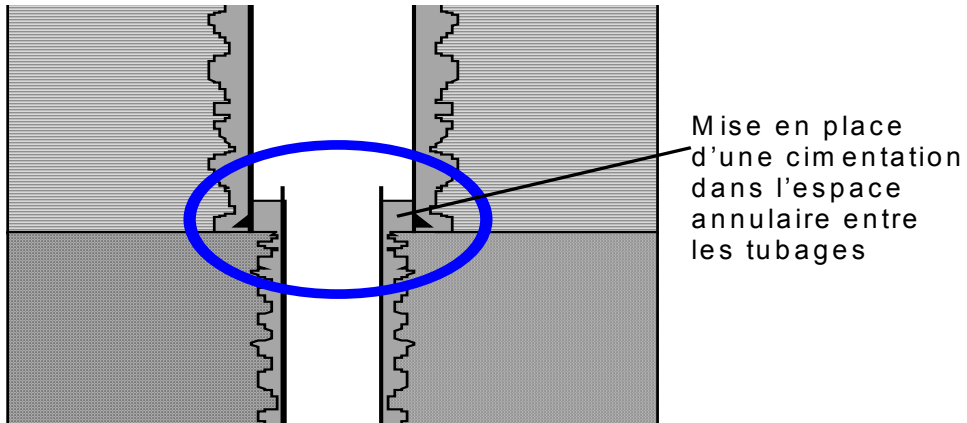


Fig. 3 - Forage captant une nappe libre peu profonde et forage captant une nappe captive.

Bon exemple



Mauvais exemple

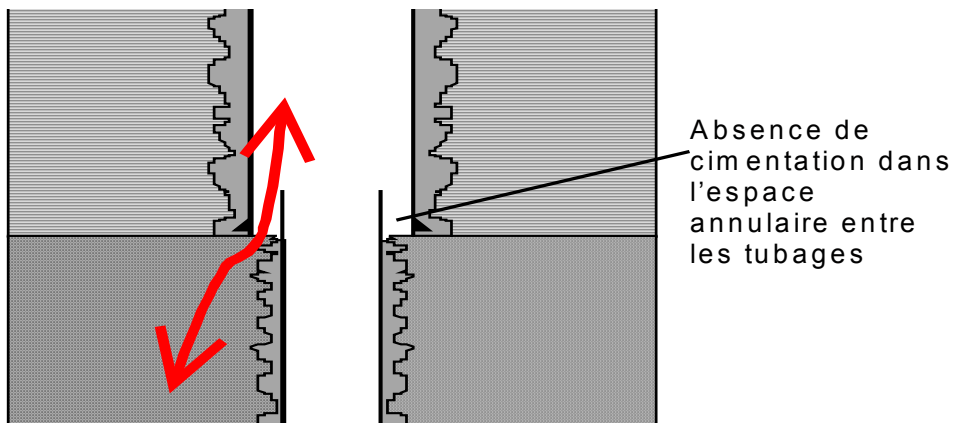


Fig. 4 - Détail d'une cimentation au niveau des télescopages dans l'espace annulaire entre les tubages.

Fiche 12 - Mise en place de la crépine et du massif filtrant et développement des forages d'exhaure et d'injection

Crépines et mise en place

Avant de descendre la colonne de captage ou d'injection, on s'assurera de la régularité du trou au moyen d'un calibreur.

La crépine constitue l'élément principal de l'équipement d'un ouvrage d'exploitation d'eau. Elle a pour fonction d'assurer la **production d'eau ou sa réinjection, sans sable en induisant des pertes de charge minimales**. Elle doit pouvoir résister à la corrosion et à la pression et avoir une longévité maximale. Les types de crépines sont déterminés suivant la forme et le pourcentage de vides pour **allier résistance et vitesse de l'eau dans les ouvertures**.

Un grand pourcentage de vides permet une faible vitesse de circulation donc une plus sensibilité aux phénomènes d'incrustation, d'érosion et de corrosion. Une vitesse de l'eau trop importante au travers de la crépine entraîne des pertes de charges.

Elle peut aussi conduire à une détérioration de la crépine. On considère que la vitesse de l'eau au travers des ouvertures de la crépine ne doit pas dépasser 3 cm/s. Cette vitesse dépend du débit de pompage, du diamètre de la crépine et de son coefficient d'ouverture.

$$\text{Coefficient d'ouverture} = \frac{\text{Surface des ouvertures sur 1 m de crépine}}{\text{Surface extérieure de la crépine sur 1 m de longueur}}$$

On rencontre les crépines :

- à trous ronds, à faible pourcentage de vide ;
- à trous oblongs, à faible pourcentage de vide, compris entre 10 et 20 % ;
- à persiennes, à faible pourcentage de vide et offrant une bonne résistance mécanique ;
- à nervures repoussées, pourcentage de vide variable et offrant une bonne résistance mécanique ;
- à fil enroulé en spirale autour de génératrices de type Johnson, à très fort pourcentage de vide.



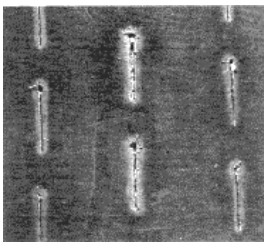
Crépine à trou oblong
Ouverture : 15 à 20 %



Crépine à ponts
Ouverture : 6 à 20 %



Crépine à fil enroulé
Ouverture : 25 à 30 %



Tubage lanterné
A proscrire

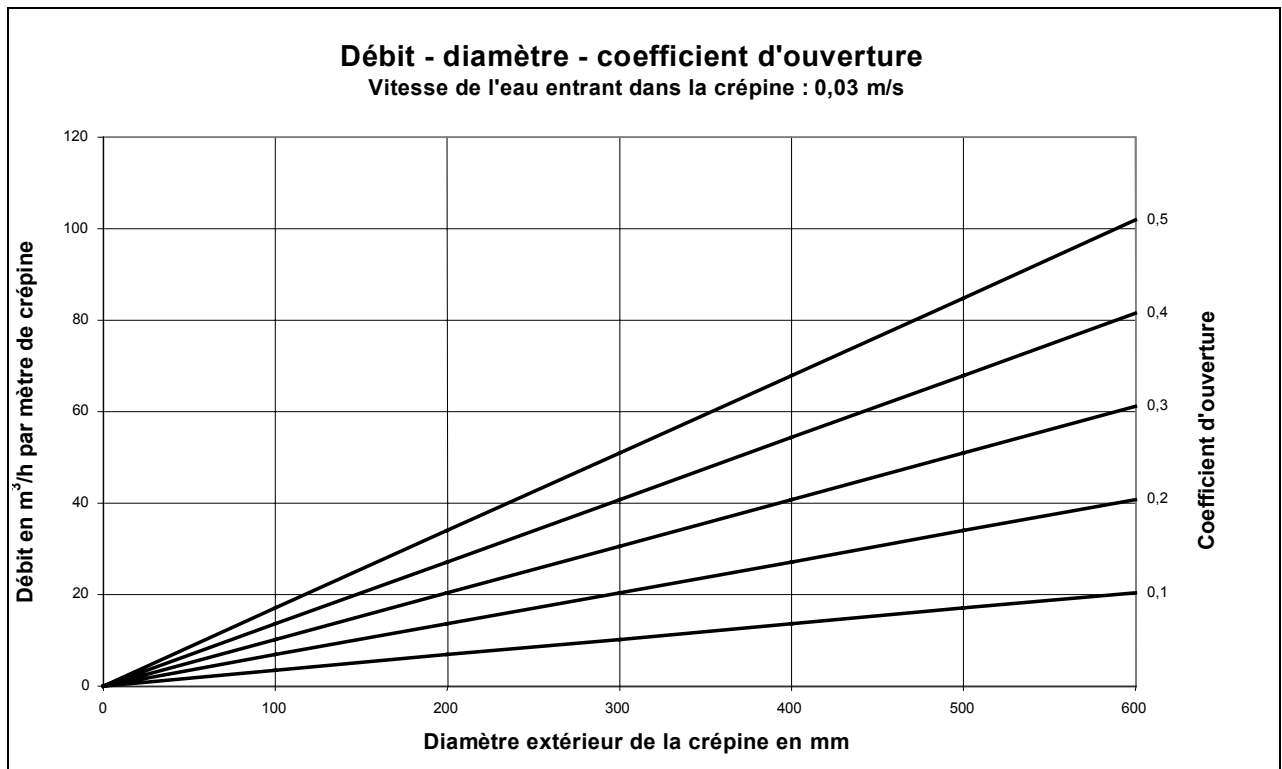
Les crépines à fentes doivent être réalisées en usine et non provenir de tubages modifiés sur le chantier de forage.

Dans ce dernier cas, le taux d'ouverture est toujours très faible et la résistance mécanique de l'élément très réduite.

La crépine est choisie en fonction de la profondeur, du type de terrain (roche consolidée comme les calcaires ou roche friable comme les sables) ou de la granulométrie des sables du niveau aquifère capté, préalablement déterminée.

Pour tenir compte du vieillissement de l'ouvrage un coefficient de l'ordre de 0,5 à 0,75 doit être appliqué au débit théorique déduit du graphique ci-après.

L'utilisation de crépines dont le coefficient d'ouverture est inférieur à 10 % doit être proscrite.



Comme les tubages, les crépines en acier peuvent être vissées ou soudées. Les crépines en PVC sont vissées et/ou collées. Lorsque les tubages et les crépines sont en acier, on doit veiller à ce que les éléments en contact soient constitués d'acier de composition identique pour minimiser la corrosion résultant de l'effet de pile (couple galvanique⁶).

La crépine est placée face au niveau producteur. Elle doit être équipée de centreurs pour assurer une répartition correcte du massif filtrant. Elle ne doit pas être dénoyée. Il est déconseillé d'y insérer la pompe. En pied de crépine est fixé un tube à sédiment constitué d'un élément de tubage d'environ un mètre et de même diamètre que cette dernière. La base doit être fermée par un « bouchon de fond ».

Dans le cas de forages producteurs en formations meubles, il faut éviter l'entraînement de **particules fines** du terrain. Dans les **terrains proches de la surface** (en simplifiant les 30 premiers mètres), le départ de ces fines peut être à l'origine de **tassements ou de fissurations** dans les bâtiments voisins et de possibles contentieux.

Par ailleurs, il faut éviter l'entraînement des sables ou des fines pour limiter les **risques d'abrasion** des pompes et de la colonne d'exhaure et **l'encrassement** du filtre et de l'échangeur. La solution réside en partie dans le dimensionnement de la crépine et du massif filtrant en acceptant le compromis entre le débit maximum que l'on souhaite exploiter et la présence de ces fines.

⁶ En présence d'eau, un courant électrique apparaît entre deux métaux différents ; le métal le plus noble attaque le moins noble.

Pour améliorer la protection vis-à-vis des fines de l'aquifère un **massif de gravier** est mis en place entre la crépine et la couche aquifère. Ce filtre artificiel doit présenter la plus forte granulométrie possible, tout en s'opposant au passage de la plus grande partie des éléments du terrain ou contenus dans l'eau à la réinjection. Dans le cas de formations consolidées ou semi-consolidées susceptibles d'éboulements, on met en place un **massif de blocage ou de consolidation**, à éléments arrondis non calcaires.

Le massif filtrant doit être constitué d'un gravier siliceux, roulé, propre, calibré et homogène. Il doit être chimiquement stable, avoir une forte porosité d'interstice et un faible coefficient d'uniformité. En général, l'épaisseur du gravier est comprise entre 3" et 8" et la réserve est comprise entre 5 et 10 m. Sa mise en place est faite par gravité, en circulation inverse du fluide ou par circulation continue.

Pour éviter les remontées de sable dans le forage de pompage, il est préférable de ne pas rabattre la nappe en dessous du toit de l'aquifère sableux lorsque le niveau piézométrique de la nappe se situe beaucoup plus haut que le toit des sables.

Développement

Le développement vise à nettoyer le trou pour **augmenter le débit d'exploitation**. Il consiste à éliminer les éléments fins colmatant naturellement le terrain ou à la suite de réalisation du forage (boues) ou à agrandir des fissures dans le calcaire, par exemple. La productivité des ouvrages peut être considérablement améliorée par différents procédés de développement : circulation à l'eau et air-lift, pompages intenses ou alternés, acidifications, pistonnage, traitements chimiques tels que floculation des argiles... Leur mise en œuvre suppose une **parfaite maîtrise technique**.

Lorsque la formation aquifère présente une granulométrie grossière, le **développement de la formation** permet aussi d'extraire les fines pour créer derrière la crépine, un massif de gravier à granulométrie décroissante sur une épaisseur de 30 à 60 cm avec les éléments plus grossiers restés en place.

Fiche 13 - Pompages d'essai et tests d'injectivité

Forage de production - pompages d'essai

L'observation des effets d'un pompage dans un forage est l'un des meilleurs moyens d'investigation de son comportement.

Trois sortes d'objectifs principaux sont assignées à un pompage d'essai :

- déterminer les caractéristiques de l'ouvrage essayé ;
- évaluer les paramètres de la couche aquifère ;
- observer directement les effets possibles de l'exploitation de la nappe « en vraie grandeur » et en déduire les débits de production probables.

Le pompage dans un aquifère, crée dans le domaine où l'écoulement naturel est modifié, un **cône de dépression** qui caractérise une **zone d'appel**. Le **niveau dynamique** est le niveau de l'eau dans l'ouvrage lors du pompage. Sa profondeur par rapport au niveau piézométrique initial donne la mesure du **rabattement** de la nappe correspondant aux **pertes de charge**. La **géométrie du cône de dépression** est déterminée par les paramètres hydrodynamiques : **transmissivité** et **coefficient d'emmagasinement**, **temps de pompage** et **débit**.

Dans une nappe libre, le cône de dépression peut significativement diminuer l'épaisseur des terrains saturés en eau. Ce n'est jamais le cas dans une nappe captive, tant que la profondeur du niveau ne devient pas supérieure à celle du toit de l'aquifère.

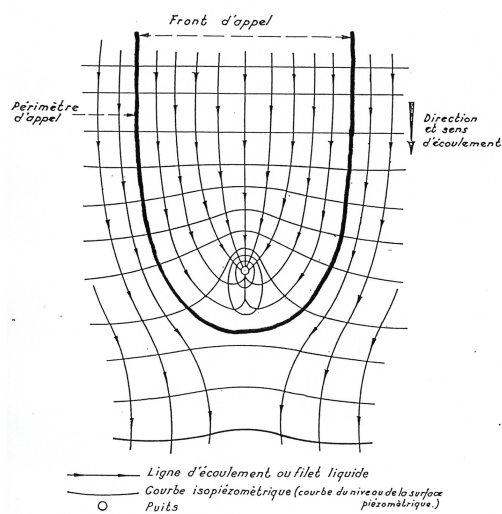
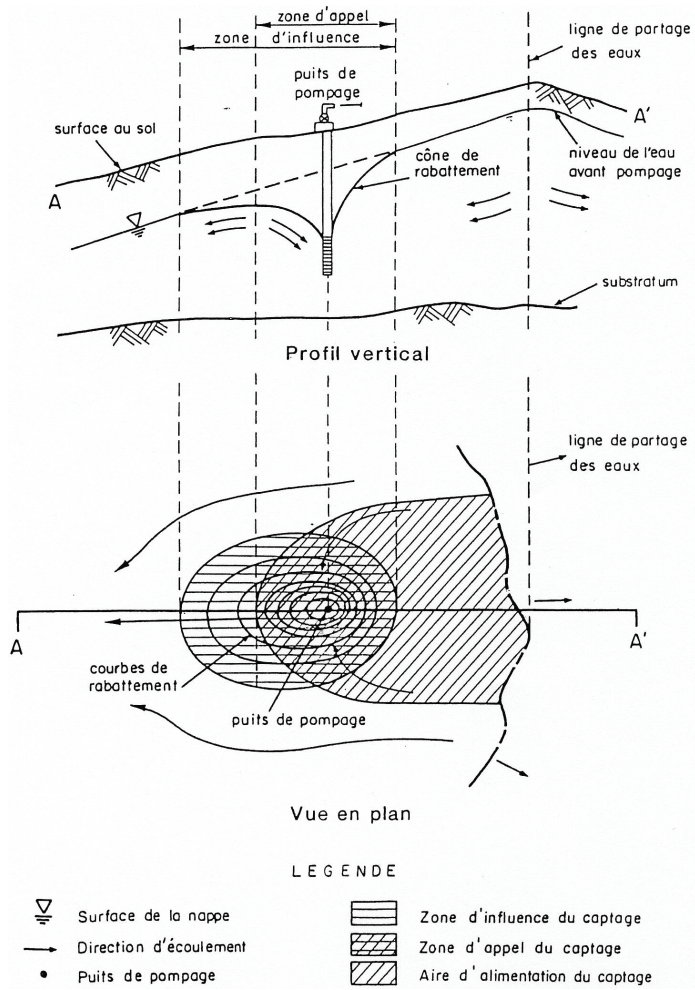
Le cône de dépression est représenté en coupe par une courbe de dépression ou en plan par des courbes d'égal rabattement, qui dans le cas d'une surface piézométrique initiale horizontale, correspondent à des cercles concentriques à l'axe du puits et assimilables à des lignes équipotentiels. Les lignes de courant, orthogonales à celles-ci convergent ainsi vers l'axe de l'ouvrage. En réalité du fait de l'écoulement naturel des nappes, la surface piézométrique est inclinée, de sorte que le cône de dépression est déformé et dissymétrique.

Essai de puits par paliers de débit

L'**essai de puits par paliers de débit de courtes durées** permet d'évaluer les **caractéristiques de captage** du complexe nappe/ouvrage de captage, grâce à l'établissement des paramètres suivants :

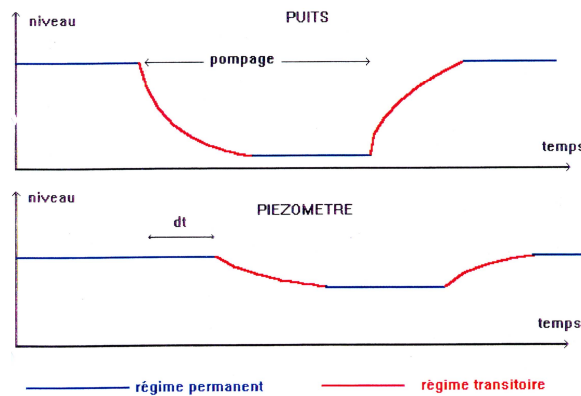
- les paramètres de **perte de charge**,
- le **débit critique**,
- le **débit d'exploitation**.

On réalise l'essai de puits à l'issue des opérations de développement pour identifier la relation débit (Q)/rabattement(s).



Influence d'un pompage sur le niveau de la nappe :
courbes d'égal rabattement, lignes de courant et zone d'appel.

Le programme d'essai consiste à réaliser une série de **paliers de pompage à débits croissants de durée constante**. Cette durée doit être suffisamment longue pour permettre une quasi-stabilisation du niveau de l'eau. Chacun des paliers est séparé par des **arrêts de durée équivalente** permettant la remontée du plan d'eau quasiment au niveau initial ; cette manière de procéder permet d'éviter toute influence du débit du palier précédent sur les résultats du palier suivant. Pour cela il faut éviter la procédure des paliers enchaînés qui nécessite un choix des débits plus contraignant et une interprétation un peu plus délicate.



Effet d'un pompage : variation de niveau dans le temps.

Les débits des différents paliers sont choisis sur la base du débit atteint en fin de développement.

Pour chaque palier de débit Q (m^3/h), on mesure le rabattement s (m). La courbe caractéristique (débits en abscisses ; rabattements en ordonnées) montre dans sa partie initiale une pente régulière (**pertes de charge linéaires** liées au terrain), puis un point d'inflexion et une partie terminale courbe (**pertes de charge quadratiques** liées à l'ouvrage). La rupture de la pente indique le **débit critique à ne pas dépasser** et le **rabattement** correspondant. Le **débit d'exploitation** sera fixé à quelques 10 % en dessous de ce débit critique. Les fortes pertes de charge quadratiques sont le signe de déficiences au niveau du forage :

- colmatage au niveau de la crépine,
- massif filtrant mal adapté ou colmaté,
- détériorations diverses (dus à un surpompage par exemple).

La courbe caractéristique s'avère être un bon moyen pour **qualifier les améliorations** à mettre en œuvre (développement) ou les **détériorations** subies lors du vieillissement de l'ouvrage (colmatages).

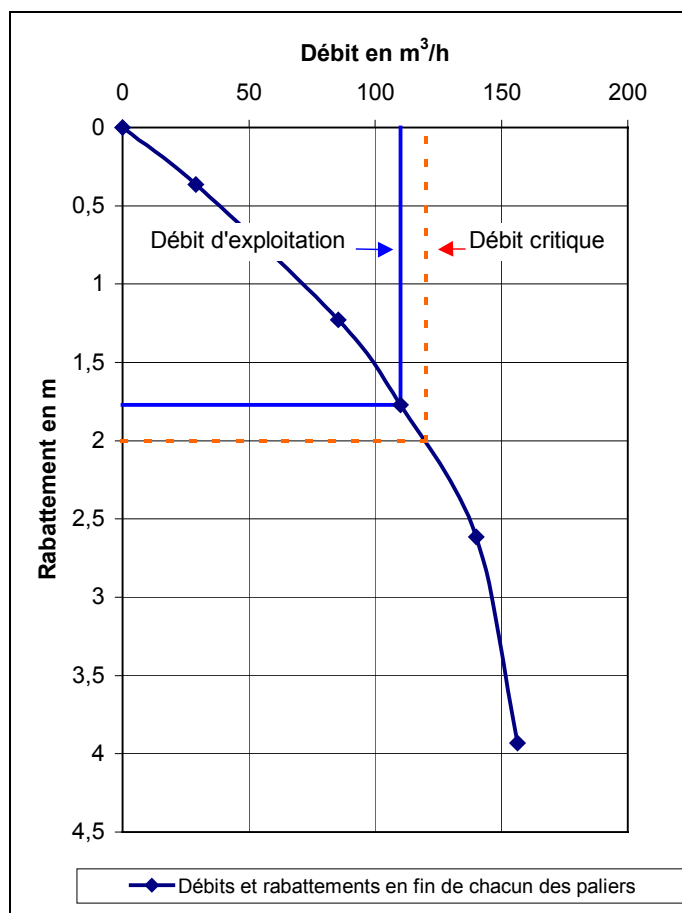


Fig. 5 - Pompage par paliers de débit.

Le débit critique est le débit au-delà duquel apparaît un régime d'écoulement turbulent faisant très sensiblement augmenter les pertes de charge quadratiques. Le débit correspondant à chaque mètre de rabattement complémentaire diminue fortement. La comparaison des résultats de tels tests réalisés à différentes époques permet d'évaluer le vieillissement de l'ouvrage.

Le rabattement spécifique (s/Q), exprimé en $m/m^3 h$, est la hauteur de rabattement mesurée dans le puits rapportée au débit pompé. La courbe débit/rabattement spécifique $s/Q = f(Q)$ (débits en abscisses ; rabattements spécifiques en ordonnées), permet de déterminer les **pertes de charges**.

La forme générale de l'équation des rabattements ou courbe caractéristique d'un forage est de la forme :

$$s = BQ + CQ^2$$

On voit que $s/Q = B + CQ$

- S = rabattement
- B = coefficient des pertes de charges linéaires ; la valeur correspond à l'intersection de la droite avec l'axe s/Q .

- C = coefficient des pertes de charges quadratiques ; la valeur correspond à la pente de la droite
- Q = débit

Il est commode de présenter les paramètres observés et les calculs sous la forme de tableau.

Selon la valeur de C, il est possible de tirer les enseignements suivants sur l'état de l'ouvrage :

C m/(m ³ /s) ²	C en m/(m ³ /h) ²	Diagnostic
< 675	< 5,2E-05	Bon forage, développement correcte
675 à 1350	5,2E-05 à 1,0E-04	Forage médiocre
1350 à 5400	1,0E-04 à 4,2E-04	Forage colmaté ou détérioré
> 5400	> 4,2E-04	Forage irrécupérable

Essai de nappe

Le **pompage d'essai de longue durée à débit constant** permet de tester le comportement hydrodynamique de la nappe, de mesurer la **transmissivité (T)** et le **coefficient d'emmagasinement (S)** de l'aquifère lorsque les niveaux peuvent être suivis dans des **ouvrages influencés**, (utilisables comme **piézomètres** pour contrôler l'évolution du cône de rabattement autour du point de pompage). Il permet d'identifier la **présence de limites**, (limite étanche, colmatage des berges d'une rivière ou réalimentation par la rivière...) avec détermination de la **distance** de cette limite au forage d'essai.

La **durée de l'essai** est souvent un compromis entre des considérations économiques (plus l'essai est long, plus il coûte cher et peut retarder l'ensemble du chantier) et un désir légitime de vérifier, selon le contexte hydrogéologique, qu'il n'existe pas « **d'effet limite** » (effet de barrière étanche, notamment) qui pourrait créer des **difficultés**, ultérieurement, **durant l'exploitation** : diminution de débit exploitable, difficulté de réinjection, niveau d'eau de réinjection plus haut que prévu, avec risque d'inondation de sous-sol voisin, par exemple. Par contre, des **durées minimales** ne peuvent être franchies.

Un essai de 2 h ou de 4 h ne permet pas de juger du comportement de la nappe. Un essai de 24 h est un strict minimum et dans la limite de certains paramètres (transmissivité et diamètre du forage).

La durée la plus communément admise est un essai de 72 h. Les guides spécialisés donnent des graphiques représentant la durée minimale de pompage pour des valeurs courantes de transmissivité et de rayon du puits de pompage.

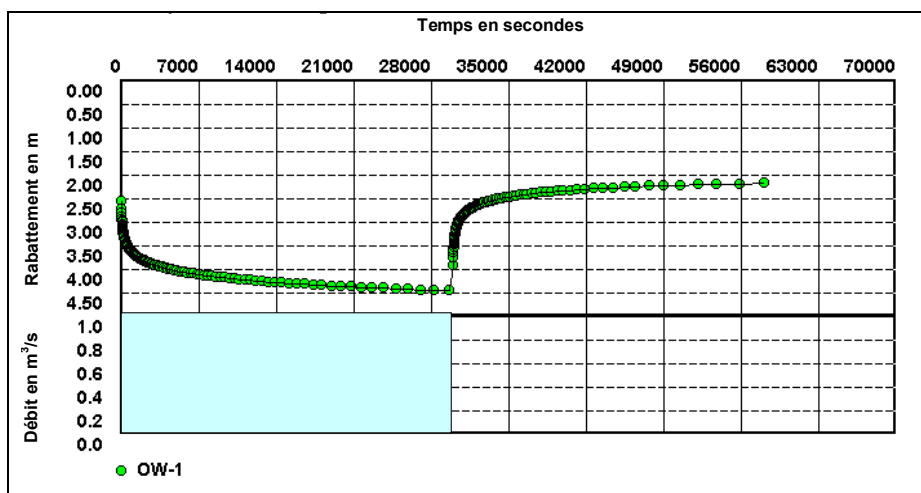


Fig. 6 - Évolution des rabattements en fonction du temps lors d'un essai à débit constant.

Les mesures de niveau doivent être poursuivies après l'arrêt du pompage. Elles peuvent en effet être interprétées et confirmer l'interprétation des mesures relevées en cours de pompage ou les remplacer partiellement lorsque la turbulence induite par la pompe ne permet pas d'obtenir des mesures fiables.

Il n'existe pas de méthode d'interprétation simple et universelle. L'interprétation des essais est actuellement rendue plus rapide par l'existence de logiciels présentant plusieurs méthodes.

Néanmoins l'interprétation d'essai en milieu très hétérogène nécessite une certaine expérience.

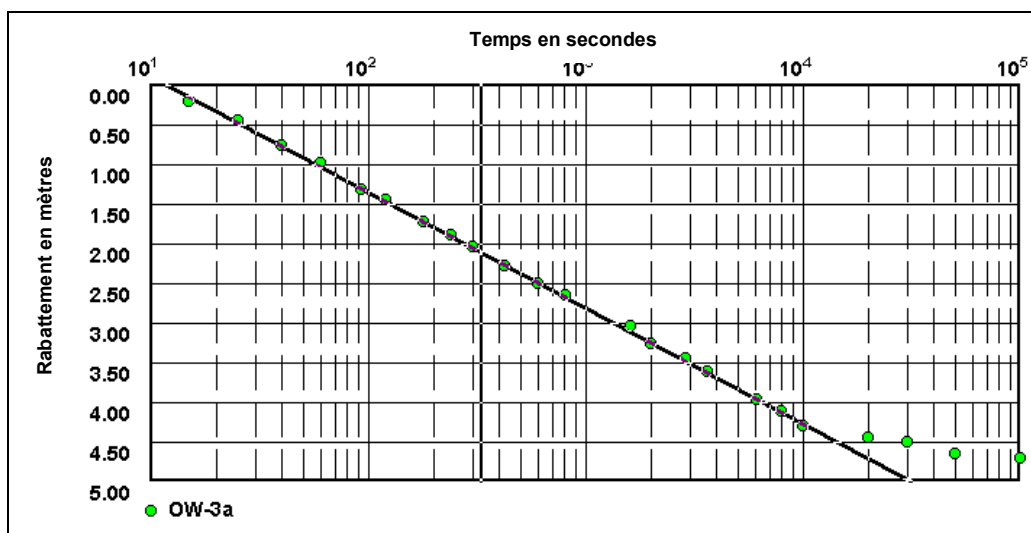


Fig. 7 - Exemple d'interprétation simple d'un essai à débit constant.

Ces méthodes permettent l'évaluation de la transmissivité. Lorsque l'on dispose de mesures de niveau réalisées dans un piézomètre, certaines méthodes permettent l'évaluation du coefficient d'emmagasinement.

L'une des méthodes les plus simples, dite approximation de Jacob, consiste à reporter, sur un graphique, le rabattement en fonction du logarithme du temps écoulé depuis le début du pompage. Cette méthode repose sur une expression simple du rabattement en fonction de la distance du point d'observation au forage de pompage et du temps :

$$\Delta = 0,183 Q / T \times \text{Log} (2,25Tt / r^2 S)$$

- Δ : rabattement (m)
- Q : débit de pompage (m³/s)
- T : transmissivité (m²/s)
- T : temps (s)
- R : rayon d'influence (m)
- S : coefficient d'emmagasinement (sans dimension)

Cette expression s'applique aux nappes captives. On peut aussi l'appliquer au cas de nappes libres dans la mesure où le rabattement est inférieur à 30 % de l'épaisseur mouillée initiale. Dans ces conditions, la porosité efficace se calcule de manière identique à celle utilisée pour le coefficient d'emmagasinement.

La pente de la droite que l'on peut tracer à l'aide des couples de points rabattement - temps écoulé permet d'évaluer la transmissivité :

$$T = 0,183 Q / 3600 i$$

- T : transmissivité (m²/s)
- Q : débit de pompage (m³/h)
- I : pente de la droite rabattement / log du temps de pompage (m)

Connaissant l'épaisseur (e) de la nappe, on en déduit la perméabilité : $K = T/e$.

A la remontée le calcul de T à partir de l'évolution dans le temps des rabattements résiduels repose sur une approche de même type de l'écoulement radial d'une nappe en direction du forage. Bien souvent, la remontée donne des résultats plus facilement interprétables que celles de la descente car les mesures de niveaux ne sont plus influencées par d'éventuelles turbulences dans le forage.

La détermination de la transmissivité peut se faire directement à partir des mesures faites dans le forage ou dans un ouvrage voisin utilisé en tant que piézomètre. Par contre le calcul du **coefficient d'emmagasinement** demande la prise en compte des mesures relevées dans le **piézomètre influencé**.

$$S = 2,25 T t_0 / r^2$$

- S : coefficient d'emmagasinement (sans dimension)
- t₀ : temps de réaction au piézomètre (intersection de la droite sur l'axe des temps) (s)
- r : distance forage – piézomètre (m)

Le rayon d'influence d'un pompage sur la nappe peut être calculé par une formule résultant de l'expression de Jacob :

$$R_f = 1,5 \sqrt{T t / S}$$

- R_f : rayon d'influence fictif (distance où le rabattement calculé par l'expression de Jacob est nul) (m)
T : transmissivité (m²/s)
S : coefficient d'emmagasinement (sans dimension)

Une **limite étanche** se décèle sur la droite représentative par une variation brusque de pente, donnant ainsi deux droites :

- l'une de pente (i) sur laquelle on peut déterminer (T) et (S) avec un piézomètre influencé,
- l'autre de pente (2 i).

La détermination du temps (t_i) à partir duquel la pente double, permet de calculer la distance (d) à laquelle se situe la limite par rapport au forage.

Une limite d'alimentation (plan d'eau, cours d'eau), entraîne une stabilisation du niveau à partir d'une durée de pompage dépendant de la distance de cette limite au forage, de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement.

Pendant les essais en nappe libre, toutes les précautions doivent être prises pour prévenir toute infiltration des eaux pompées à proximité du forage.

Forage d'injection - tests d'injectivité

Bien que pompage et injection ne soient pas des phénomènes strictement symétriques, l'influence d'une injection sur le niveau de la nappe peut être calculé, en première approximation, avec les modèles utilisés pour l'interprétation des pompages d'essai.

Souvent cependant, le **rendement du forage d'injection** est inférieur à celui du forage de pompage. En effet, il n'y a pas totale réversibilité des écoulements. L'injection fait intervenir les mêmes paramètres hydrauliques ou hydrogéologiques qu'un pompage (transmissivité, coefficient d'emmagasinement, limites de la nappe, débit, durée) mais les valeurs de ces paramètres qui peuvent être mesurées sur le terrain ne sont pas identiques. Ce phénomène est notamment lié à la présence d'air dans la partie de l'aquifère située au-dessus du niveau initial.

Cette **moindre performance du pompage d'injection** fait que parfois, il faut envisager un second forage d'injection pour exploiter le débit donné par un seul forage de production. Dans les cas où le débit à réinjecter est important et où le niveau naturel de la nappe est haut (par exemple aquifère à proximité d'une réalimentation par un fleuve), il faut envisager parfois trois forages de réinjection pour un seul forage de production.

Les tests d'injection longue durée permettent de reconnaître **la capacité d'absorption de la nappe**, de mesurer **le débit maximal de réinjecter** et **la remontée provoquée de la nappe** par l'injection, de telle sorte que celle-ci soit acceptable pour les infrastructures existantes, notamment les bâtiments en sous-sol.

Ces essais sont généralement menés avec la pompe du foreur et non avec la future pompe d'exploitation.

Lorsque l'installation comprend un puits de production et un ou plusieurs puits de réinjection, on vérifie, par un test « en boucle », au moyen de liaisons hydrauliques provisoires, que le(s) forage(s) d'injection absorbent bien le débit souhaité. Ce **test en boucle** est à mener au strict minimum pendant 24 h et de préférence pendant 72 h ; au-delà si l'on craint un **effet de limite étanche** ou si la **nappe est proche du sol**.

Lorsqu'il y a deux ou plusieurs forages, il faut veiller à répartir correctement le débit entre les forages (et non 80 % du débit sur un forage, au risque de le faire déborder, à 20 % sur le deuxième forage). Pour cela, la mise en place de « **vannes d'équilibrage** » est recommandée.

Un **compteur en tête** du forage sera installé pour vérifier les performances d'injection et détecter un début de colmatage ou d'éventuelles fuites dans le réseau de canalisations de surface, par comparaison entre les débits d'injection et de pompage.

Fiche 14 - Abandon provisoire ou définitif d'un forage

L'arrêt de l'activité d'un forage, définitif ou pour une période supérieure à deux ans, doit être **déclaré au préfet**. Le défaut de déclaration est passible de **sanction**.

A la suite d'une période d'arrêt, le préfet peut décider que la remise en service de l'ouvrage soit subordonnée à une nouvelle déclaration ou une nouvelle autorisation.

Un forage peut être abandonné parce qu'il ne donne pas le débit ou la qualité d'eau escomptés à l'issue de la reconnaissance. Un forage peut ne plus être maintenu en exploitation pour diverses raisons techniques ou économiques. Dans tous les cas, un forage abandonné doit être « **mis en sécurité** ».

Cette mise en sécurité consiste à **pérenniser l'étanchéité initiale entre les différents horizons aquifères traversés et régionalement isolés** ainsi qu'à **prévenir toute pollution de ces aquifères à partir de la surface**.

Le **programme de fermeture** est soumis à l'approbation des autorités compétentes (DRIRE).

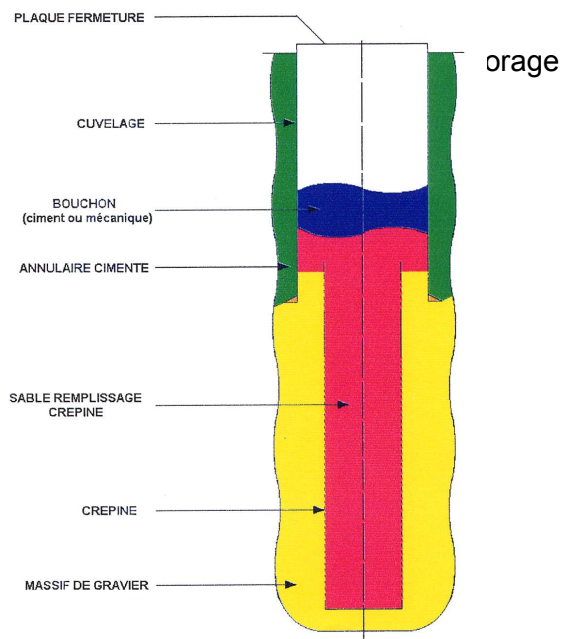
Le rebouchage intégral peut comprendre soit la pose de **graviers siliceux propres** face à la zone crépinée en s'attachant à conserver une zone de 5 m d'épaisseur environ au sommet de la crépine afin de procéder à la mise en place d'un bouchon de ciment destiné à isoler l'aquifère des formations supérieures et une **cimentation** du reste du forage jusqu'à la surface, soit une cimentation sur toute la hauteur du forage, y compris la zone crépinée.

Dans le cas d'un abandon provisoire, on préférera la première solution.

Dans tous les cas, l'étanchéité du ciment sera contrôlée par un test en pression exécuté selon les règles de l'art.

Les opérations de mise en sécurité doivent être réalisées avec le plus grand soin. Dans le cas de forages profonds, ces opérations sont généralement complexes à concevoir et à réaliser. Elles doivent être exécutées par des entreprises spécialisées. En particulier, le ciment doit être compatible avec la qualité de l'eau des aquifères afin d'éviter, lors de la mise en place, dilution et défaut de qualité finale.

L'abandon du forage doit être signalé à l'Agence de l'Eau, si celui-ci figurait sur ses registres.



Abandon et mise en sécurité d'un forage.

Fiche 15 - Équipement des forages d'exhaure et d'injection

Les tests qui suivent la réalisation des forages d'exhaure et d'injection fournissent leur « carte d'aptitude ».

Lorsque le débit permet une exploitation, le bureau d'étude procède à la définition, au dimensionnement et à l'adaptation des matériels d'exhaure, d'injection et de régulation, préalablement à la commande et à l'approvisionnement en équipements. Suivant l'importance du chantier et du calendrier des autres corps d'état (construction d'un bâtiment neuf ou réhabilitation totale d'un bâtiment existant) **un délai d'un à plusieurs mois peut s'écouler**.

Équipement du forage d'exhaure

Après livraison des équipements et avant leur installation, il est prudent de procéder à un nouveau nettoyage du forage à l'émulseur (air-lift), avec vérification (plus courte) des débits et rabattements, **notamment si la période d'arrêt a été relativement longue**. Ce contrôle permet de vérifier que le forage ne s'est pas dégradé (endommagement involontaire en cours de chantier de construction ou développements bactériens, parfois algaires, avec début de colmatage). Dans ce cas, il faut procéder à une nouvelle opération de développement du forage.

Lorsque le forage a conservé (ou retrouve) son aptitude d'origine, la pompe immergée d'exploitation définitive ainsi que les divers matériels annexes (variateur éventuel, asservissements, alarmes...) sont mis en place. L'installation de la pompe au niveau de crépines est à proscrire.

C'est en général l'entreprise chargée de l'exécution du forage qui équipe le forage car toute introduction d'un appareillage demande un savoir-faire pour éviter des dégradations. Mais il peut arriver que ce soit une entreprise chargée de poser d'autres équipements électriques ou une société de services spécialisée.

La **colonne d'exhaure** est en principe suspendue et maintenue par des colliers de fixation, sur des profils métalliques type IPN et comprend en tête un **clapet** et une **vanne d'isolement**. Ses caractéristiques doivent permettre de maintenir la pompe en place et de résister au couple de torsion résultant du fonctionnement, notamment lors du démarrage.

L'aspiration de la pompe sera placée de façon à éviter les **phénomènes de cavitation** : au minimum la « NPSH » ou « Net Positive Suction Head » du constructeur ou charge nette absolue à l'aspiration. En pratique, on place la pompe de 3 à 5 m sous le niveau le plus bas de l'eau au cours du pompage et au moins 2 m au-dessus du fond du forage.

On s'assurera que la pompe possède un clapet anti-retour, de façon à éviter à chaque arrêt, le **reflux de la colonne d'eau**, avec brassage et risque d'aération de l'eau à l'origine de déséquilibres chimiques. Cette précaution permet également d'éviter de

faire déviper la pompe en rotation inverse, ce qui peut occasionner son endommagement en cas de redémarrage concomitant.

Le fonctionnement des pompes sera asservi à la **détection de la présence d'eau dans le forage**. On placera des **électrodes** de façon à ne jamais dénoyer l'aquifère et les crépines du forage. Dans le cas général, le dénoyage de l'aquifère, même partiel, entraîne des cycles d'oxydo-réduction, se traduisant par un processus de colmatage. Ce cas est fréquent avec des eaux contenant du fer. A noter que quelques aquifères surtout calcaires, peuvent cependant être dénoyés, après avis d'un hydrogéologue.

En général, 3 électrodes sont placées. Une au fond du forage, toujours noyée. Une deuxième, 3 m environ au minimum, au-dessus de la tête de pompe : son dénoyage coupe un circuit d'alarme et entraîne l'arrêt de la pompe. Une troisième beaucoup plus haut permet un redémarrage de la pompe avec un niveau d'eau suffisant pour un pompage prolongé en évitant ainsi des marches et arrêts répétés.

La montée en débit (et l'arrêt) sera progressive, sans passage brutal de l'arrêt au débit préconisé. Si le passage est brutal, on risque, d'une part des afflux dans le forage de particules venant du terrain ou du massif filtrant et d'autre part, la création de contraintes au niveau des conduites (prévoir un dispositif anti-bélier, ou un réservoir à vessie ou à diaphragme). Pour le **démarrage progressif**, la **temporisation** à prévoir est de l'ordre d'une minute.

Il convient de prévoir la pose d'un tube de petit diamètre (1 à 2") dans lequel la sonde électrique manuelle sera glissée. Ce tube évitera l'enroulement de la sonde autour des brides de la colonne d'exhaure ou autour de la pompe. S'il s'agit d'un capteur de pression relié à une centrale d'acquisition de mesures, ce dispositif sera lui aussi à insérer dans un tube de protection pour éviter les risques d'écrasement.

En cas de traitement en fond de puits, le dispositif sélectionné sera installé préalablement à la mise en place de la pompe d'exhaure.

Équipement du forage d'injection

Dans le cas d'un rejet en nappe, le forage d'injection est équipé au minimum d'une colonne d'injection et de sondes de niveau d'eau, parfois d'une pompe d'injection placée en surface.

Comme pour le forage d'exhaure, les **sondes de niveau d'eau** permettent de suivre l'évolution des niveaux et de détecter prématurément des débuts de **phénomènes de colmatage** ou une **remontée généralisée du niveau de la nappe**, à la suite de pluies excédentaires par exemple. Ces phénomènes peuvent diminuer les performances de la réinjection.

Les sondes ont aussi un rôle d'alerte, lorsque le niveau de l'eau remonte trop haut avec **risques de débordement** dans un parking souterrain à proximité immédiate ou de **modification des structures de fondation**. Dans ce cas, la sonde peut être couplée à une gestion centralisée qui arrête le forage de production ou diminue son débit ou oriente, par des vannes motorisées, le rejet d'eau vers un autre exutoire.

La colonne d'injection doit pénétrer suffisamment dans la nappe sous le niveau statique du forage pour éviter la cavitation de l'eau. On veillera à ce que l'ensemble de la canalisation de rejet soit à une pression supérieure à la pression atmosphérique, sans fuite ni prise d'air. On veillera à ne jamais faire arriver de l'air dans les crépines du forage de réinjection. En aucun cas, on ne devra rejeter l'eau librement en tête de forage. Il pourrait se produire une oxygénation de l'eau avec risque de réactions chimiques pouvant créer des colmatages surtout lorsque l'eau contient du fer ou le développement de populations bactériennes.

L'injection est **sensible au colmatage**, surtout pour les aquifères sableux. Ce phénomène est lié à la présence **de matières en suspension**, à la **présence potentielle d'air**, à la **modification de la température** ou encore, à la **présence potentielle de bactéries ou de substances organiques**. Ces paramètres peuvent influencer sur diverses précipitations (carbonates de calcium, hydroxyde ferrique...), sur la **mise en solution suivie de redéposition** de certains composés (gypse par exemple).

La modification de la température de l'eau, peut favoriser les développements bactériens avec création de dépôts colmatants

La modification des teneurs en gaz dissous peut avoir des conséquences sur le chimisme du milieu. Une forte élévation de la température du rejet (cas d'installations de rafraîchissement et de climatisation) ou le dégazage d'une eau riche en CO₂ vont favoriser le **dépôt de matériaux carbonatés**.

La présence de **bulles d'air** peut obturer les pores du terrain et diminuer sa perméabilité.

Comme dans le cas de forages d'exhaure, l'équipement des forages d'injection doit éviter :

- toute infiltration d'eau à partir de la surface,
- toute mise en communication entre les différents horizons aquifères éventuellement traversés par l'ouvrage.

Équipements installés en surface

La **tête du forage** coiffe l'extrémité supérieure du forage. Elle assure la liaison avec les réseaux de surface et interdit toute pénétration d'eau parasite dans le forage. Le sommet de la tête sera hors d'eau à une hauteur supérieure au sol non inondable de 0,50 m.

Le tubage atteignant la surface du sol doit être cimenté sur environ 3 m ou plus et fermé à son extrémité supérieure au moyen d'une plaque soudée traversée par la conduite de refoulement et éventuellement par les câbles électriques alimentant la pompe.

Ce dispositif est complété par une dalle en ciment dont la dimension est supérieure ou égale au diamètre du tubage majoré d'un mètre. En zone inondable, l'aménagement de la tête de puits doit prévoir l'installation d'une rehausse afin que l'extrémité supérieure du tubage puisse demeurer au-dessus du niveau des plus hautes eaux.

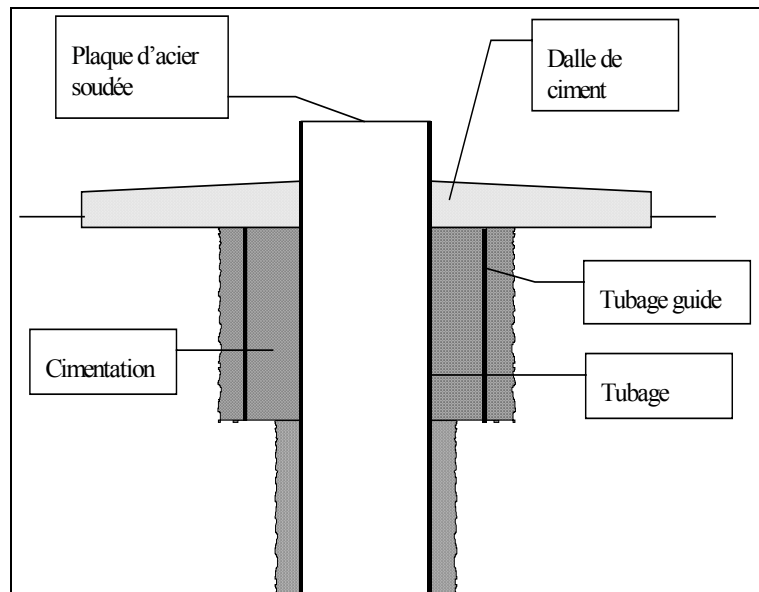


Fig. 8 - Exemple de tête de forage.

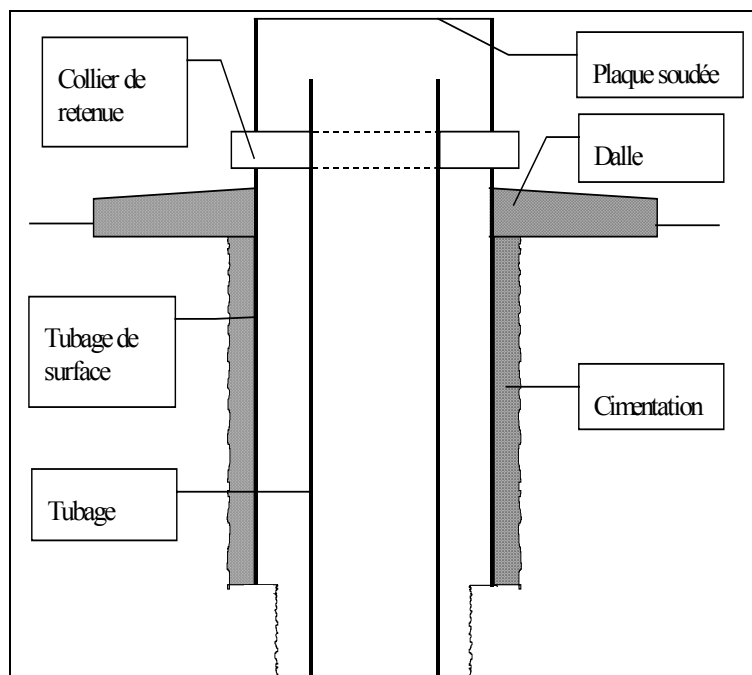


Fig. 9 - Autre exemple de tête de forage.

En cas d'artésianisme (puits producteur) ou de remontée de nappe avec risque de débordement (puits injecteur), le forage doit être conçu et réalisé pour résister à la pression de l'eau. Il doit aussi être hermétiquement fermé par un dispositif approprié afin de prévenir tout écoulement pendant ou en dehors des périodes d'utilisation.

Si la tête du forage doit être enterrée, la cave sera protégée des éventuelles accumulations d'eau ou d'éléments polluants par une dalle de propreté de 20 cm

d'épaisseur et un drain. L'accès sera prévu et dimensionné pour permettre la manœuvre d'une machine de forage lors des opérations d'entretien et de nettoyage du forage et de la pompe. Lorsque le forage se trouve en sous-sol de bâtiment, il est utile de prévoir une réservation dans le plancher du sous-sol immédiatement supérieur, à l'aplomb du forage, de façon à faciliter les manœuvres.

La tête doit être aménagée pour **permettre le passage des liaisons hydrauliques** (canalisation vers l'échangeur ou en aval de l'échangeur) et **électriques** (câble d'alimentation électrique de la pompe, renvoi d'information sur le niveau d'eau ou la pression en tête de forage vers une gestion centralisée) ou **l'installation des équipements** : tube piézométrique, robinet de prise d'échantillon, clapet anti-retour, éventuellement vanne de réglage, filtre anti-sable, compteur de débit... Si la place le permet, un filtre anti-sable, un compteur de débit seront placés également dans le local ou la cave de la tête de forage d'exhaure. Sinon, ils seront placés dans un local technique situé à proximité du forage.

Le **débitmètre** (ou compteur volumétrique) sera posé en surface sur une canalisation toujours entièrement remplie, avec une section droite amont de 5 fois le DN (diamètre nominal) et de 2 fois le DN en aval. On évitera la pose dans un point élevé de la canalisation, car il y a risque d'accumulation de bulles d'air qui peuvent fausser la mesure.

Le dispositif de traitement anti-corrosion-dépôt comprend généralement une ou deux **cuves de stockage du produit** et une **pompe doseuse** qui injecte le produit en continu ou en quasi-continu. La pompe doseuse est généralement asservie au débitmètre. Ceci permet une adaptation au débit réel à traiter. En cas de détection d'un débit nul, aucun produit n'est injecté, sauf exception dans le cas, notamment, de travaux de longue durée. D'autres dispositifs fonctionnent avec une cuve remplie de différents matériaux (« filtre multi-média ») à travers lesquels circule l'eau en sortie de forage, avant échangeur. Ce type de dispositif est sensible aux venues de particules et doit être protégé par des filtres à faible maille (100 µm).

Le dispositif de traitement bactéricide comprend généralement une **cuve de stockage du produit** et une **pompe doseuse** qui injecte le produit par à-coups (batch). La pompe doseuse est généralement asservie à un **débitmètre électromagnétique**, au moyen d'un **totaliseur d'impulsion** et la durée de fonctionnement est fixée par une **temporisation**.

Comme dans le cas de forages d'exhaures, l'équipement des forages d'injection doit éviter :

- toute infiltration d'eau à partir de la surface,
- toute mise en communication entre les différents horizons aquifères éventuellement traversés par l'ouvrage.

Fiche 16 - Achèvement des travaux. Contrôles et réception des installations

Achèvement des travaux

À l'issue des travaux de forage et des essais de pompage et d'injection, le site du chantier de forage est libéré, nettoyé, les déblais évacués en décharge autorisée.

Un compte rendu comprenant une coupe schématique de(s) l'ouvrage(s) réalisé(s) et des terrains traversés (coupe foreur) avec localisation du (des) forage(s) et données des pompages d'essai et d'injection sont transmis à la DRIRE et à la MISE pour enregistrement et archivage, notamment dans la banque de données du sous-sol du BRGM.

Un ultime contrôle sert à tester le bon fonctionnement de la (des) pompe(s), les matériels annexes et le(s) forage(s). Cet essai peut être réalisé sur une durée de 24 h, par exemple. Le forage d'exhaure déclaré « **prêt à servir** » doit être équipé d'un compteur. Celui-ci sert au contrôle du fonctionnement de l'installation et à l'enregistrement des volumes d'eau prélevés qui sont soumis à une redevance payée à l'Agence de l'Eau. Ainsi le compteur et sa pose doivent être agréés par cette dernière.

Lorsque le forage d'injection, s'il existe, la boucle « surface » sont prêts, que les différentes connexions électriques et hydrauliques sont achevées, l'ultime contrôle constitue la **réception des installations**.

Il est souvent précédé de **phases de réglages intermédiaires**, notamment pour les asservissements. Cette phase peut nécessiter plusieurs jours. Au début, il est prudent de ne pas faire passer l'eau du forage d'exhaure par l'échangeur, au moyen d'un by-pass (indispensable pour la suite lorsqu'il faudra nettoyer ou développer le(s) forage(s). Pendant ce contrôle, les variations de débit, montées en pression, qui peuvent avoir lieu pendant la future exploitation de l'installation, sont testées. Des simulations de panne, de démarrage d'un « secours » (eau de ville ou autre forage que le forage de production habituel) sont faites. S'il y a une pompe de rétro-lavage dans un puits d'injection, l'essai de réception doit inclure un cycle de rétro-lavage. Cet essai de réception dure souvent une à deux semaines.

À l'issue de ces divers contrôles, un **dossier des ouvrages exécutés (DOE)** est remis à l'exploitant ou au maître d'ouvrage. Il contient le descriptif précis du (des) forage(s), de la, (des) pompe(s), des divers matériels, les adresses de fournisseurs pour la maintenance ou les pièces d'usure, les consommables, donne obligatoirement des **consignes d'exploitation** (débit à ne pas dépasser, niveau d'eau à ne pas dépasser, nombre de marches-arrêts autorisés, durée des arrêts, cycles de rétro-lavage, contrôles périodiques à effectuer, maintenance à programmer...).

Un **dossier des interventions ultérieures** est également à remettre. Il contient les indications sur les nettoyages de forage à entreprendre, la périodicité des contrôles par caméra, les changements de pompe ou de canalisations à programmer, le rebouchage du forage en fin de vie.

Enfin lorsque l'exploitation est fonctionnelle, elle doit être portée à connaissance de l'Agence de l'Eau.

Les périodes de garantie courent à partir de la réception des différentes composantes de l'installation.

Fiche 17 - Suivi et maintenance de l'infrastructure souterraine

Dispositions générales

L'exploitant peut intervenir sur le fonctionnement de son installation. En revanche, il ne peut intervenir sur l'évolution naturelle de la nappe ni sur l'évolution des pompages au voisinage, mais il doit pouvoir en tenir compte. Ainsi, l'exploitant devra s'assurer si :

- la ressource diminue, naturellement ou à cause de prélèvements au voisinage, afin de l'intégrer dans la gestion de son installation ;
- ses forages se maintiennent en bon état de fonctionnement ou se dégradent, avec un risque dans un premier temps, d'augmentation des charges d'exploitation et, dans un deuxième temps d'arrêt d'exploitation.

Suivi de la nappe

Lorsque le(s) forage(s) est (sont) en **période d'activité**, il convient de noter le niveau statique, au repos, après chaque arrêt de tout pompage pendant au moins 24 h.

Si le forage est en **période de non-activité**, il convient de noter le niveau de l'eau dans le(s) forage(s) au moins tous les mois et si possible toutes les semaines. La mesure du niveau d'eau se fait souvent avec une simple **sonde électrique manuelle**. L'idéal est de disposer d'un enregistrement en continu à l'aide d'un **capteur de pression** étalonné relié à une **centrale d'acquisition de mesures**. Ce type d'enregistrement permet de mettre en évidence des perturbations ponctuelles mais répétitives à fréquence variable, liées à d'autres prélèvements au voisinage.

Contrôle des pertes de charge des forages d'exhaure et d'injection

Effectuer au moins tous les semestres un contrôle des **pertes de charge des forages**. La fréquence est à adapter si une augmentation des pertes de charge est constatée. Les pertes de charge et leur évolution dans le temps seront évaluées au moyen d'essais par paliers qui seront exécutés dans les mêmes conditions que celui réalisé à l'issue du développement.

Contrôle du fond des forages

Effectuer un contrôle du **fond du forage**, à l'occasion de chaque remontée de pompe et au moins tous les trois ans à cinq ans. Un **comblement** brutal ou progressif et continu du (des) forage(s) traduit un dysfonctionnement qu'il faudra traiter. Le contrôle se fait soit simplement avec une **sonde lestée** soit avec du matériel plus sophistiqué (**diagaphies**). A noter que la sonde lestée ne permet pas toujours de contrôler la présence de dépôts gélatineux, à très faible consistance mais néanmoins colmatants.

Contrôle du sommet du gravier

Selon la configuration du (des) forage(s), effectuer au moins une fois par semestre le contrôle du sommet du gravier additionnel. Si ce niveau diminue régulièrement, cela traduit soit la création de cavités dans le terrain, soit un **entraînement de particules** du terrain et/ou du massif filtrant. Après inspection de l'intérieur du forage pour mettre en évidence les détériorations éventuelles du tubage et/ou des crépines, une ou plusieurs actions correctives seront à réaliser : ajout de gravier, chemisage du tubage en place, remplacement des crépines, diminution du débit d'exploitation...

Contrôle de l'état intérieur des forages

Prévoir un contrôle de l'état intérieur du (des) forage(s) selon une périodicité dépendant du contexte hydrogéologique : en pratique et en règle générale, tous les 3 à 5 ans. Ce contrôle se fait par une **inspection vidéo par caméra immergée**. L'idéal est d'effectuer également d'autres **diagraphties** : diamètreur pour vérifier une éventuelle ovalisation des casings ou crépines ; **CBL** pour vérifier l'état des cimentations.

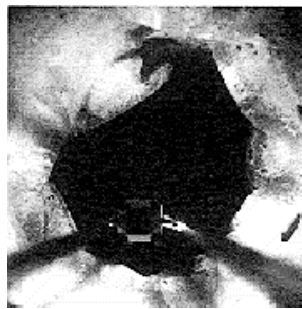


Fig. 1 - Inspection vidéo d'un tubage endommagé.

Nettoyage des forages

Prévoir un nettoyage du (des) forage(s) tous les 6 à 10 ans environ. Il comprend un **curage** des éventuels sédiments déposés en fond du forage, un **brossage des tubages et crépines** et éventuellement un **traitement chimique**. Ceci suppose qu'une machine de « servicing » puisse accéder au droit du forage. Pour les forages situés en parking souterrain, prévoir si possible, des trappes au-dessus de la tête du forage, pour faciliter les manœuvres et un contrôle d'atmosphère avec aération dans le cas de dégagement potentiel de gaz : dégagés par des moteurs de machines ou résultant du traitement chimique du forage. Bien que peu fréquents, ces risques d'intoxication du personnel existent et doivent être mentionnés dans le PPSPS (Plan Particulier de Sécurité et Protection de la Santé) établi en début de chantier. Le maître d'œuvre ou le coordinateur sécurité devront demander la fiche de sécurité des produits chimiques éventuellement utilisés. Les règles de sécurité du personnel doivent être scrupuleusement respectées (usage de gants, de lunettes...). Dans le cas des forages en parkings souterrains d'immeubles, il faut vérifier si le règlement de sécurité interne interdit l'usage de certaines classes de produits. Dans des cas rares, lorsque le dosage est inadéquat, il peut y avoir des projections (par exemple avec de l'acide ou du peroxyde d'hydrogène). Dans le cas des forages réalisés en sous-sol, des précautions

doivent être prises au niveau de la trappe surmontant le forage, car parfois les projections, canalisées par le tubage du forage, peuvent avoir une force suffisante pour soulever cette trappe.

Respect absolu du débit maximum d'exploitation

Chaque forage de production est livré avec un **débit maximum d'exploitation** qu'il ne faut **jamais dépasser**, même très temporairement. En cas de dépassement, on risque de réorganiser différemment la granulométrie des particules autour du forage et « d'arracher » des particules du terrain ou du massif filtrant, de créer des « ponts de sable » c'est-à-dire des zones où le massif filtrant n'est plus correctement en place et laisse passer des flux de particules, entraînant alors une **abrasion** des crépines, de la pompe immergée, de la colonne d'exhaure et de tous les matériels en aval, ainsi qu'un **colmatage** de la crépine, de la pompe avec le risque de surchauffe du moteur, du filtre en surface, de l'échangeur ou de la pompe d'injection. Une attention particulière est portée sur les conditions d'exploitation de la nappe et/ou du (des) forage(s) ; si celles-ci viennent à changer de façon significative, le débit maximal peut être revu à la baisse.

Notons pour finir que le débit d'exploitation peut être conditionné par la capacité d'absorption du forage d'injection comme mentionné sur la fiche 13 ci-avant.

Dispositions particulières au forage d'exhaure et à ses équipements

Les pompes immergées

Hormis le cas de quelques forages fonctionnant en artésien, la pompe d'exhaure est l'équipement indispensable à la fourniture d'eau. Il est impératif de respecter les préconisations du constructeur :

- ne pas dépasser le **nombre maximal de démarrages par heure** ;
- ne pas chercher à se placer sous le **débit minimal de fonctionnement** préconisé ni, bien sûr, au-delà du **débit maximal** ;
- ne pas faire fonctionner en eau trop chargée de particules, toutefois les pompes immergées de forage ont une certaine tolérance au sable.

Si des sédiments se déposent, en tenir compte pour prévenir les risques de colmatage. Si la pompe aspire des sédiments, il y a **risque de colmatage** de la crépine de la pompe, gêne pour le refroidissement du moteur et risque de surchauffe, risque d'entrave à la libre rotation de l'hydraulique de la pompe.

Le fonctionnement du clapet anti-retour de la pompe est à contrôler au moins une fois par an.

Contrôler au moins tous les trimestres les **paramètres électriques de la pompe**, qui sont de bons indicateurs indirects de dysfonctionnements : consommation électrique, puissance, tension, intensité absorbée, résistance entre phases, fréquence en sortie de variateur, isolation électrique du câble et du moteur.

Vérifier le bon fonctionnement des **électrodes de niveau** trimestriellement. Parfois, une gangue se forme autour de l'électrode et l'isole du milieu, faussant les résultats.

Contrôler tous les mois la temporisation de la montée en débit progressive. Eviter de laisser les pompes à l'arrêt total plus d'un mois. Faire tourner chaque pompe au moins 8 h/mois. Contrôler chaque pompe en atelier au moins tous les trois ans.

Après un arrêt plus ou moins prolongé, prévoir un **rejet de l'eau** pendant une dizaine de minutes au minimum (si possible pendant plusieurs heures, voire une journée) vers un égout ou un réseau pluvial (après accord du concessionnaire du réseau concerné) et non dans le circuit de l'échangeur thermique.

La colonne d'exhaure

Il convient de contrôler visuellement à chaque passage sur site, **l'état de la tête de colonne** et à chaque remontée de pompe **l'état des tubages** (traces de corrosion, de dépôts, intérieurs ou extérieurs), des brides ou des filetages. Le matériau de la colonne d'exhaure doit être adapté à la chimie de l'eau (ce qui suppose qu'une analyse d'eau soit faite). Il peut aussi être employé une colonne souple (type Wellmaster), qui n'est pas sensible à la corrosion.

Contrôle de la tête du forage ou de la cave de la tête du forage

Il est recommandé de vérifier tous les ans l'état, la stabilité, l'étanchéité, de la tête du forage ou de la cave de la tête du forage.

Le débitmètre

Suivre les consignes du constructeur qui portent en général sur l'installation du matériel, sur la compatibilité avec le fluide, sur le réétalonnage périodique. Le débitmètre ne tolère pas une eau chargée en particules.

Le filtre en surface

Le rôle de ce filtre est de retenir des particules pouvant encrasser l'échangeur, la pompe et le forage de réinjection. La présence de particules n'est pas un signe de dysfonctionnement car un forage laisse toujours passer quelques particules. A la conception du forage, le désir de réduire au maximum les arrivées de fines se traduit presque toujours par une nette diminution du **débit exploitable**. Or les pompes immergées ont une certaine tolérance aux matières en suspension. Par contre, l'augmentation de la **charge en particules**, pour un même pas de temps est un signe de dysfonctionnement.

Les préconisations sont :

- Contrôler les **pertes de charge** au moins une fois par semaine, par différence de pression entre l'entrée et la sortie de chaque filtre. Bien noter la pression amont, la pression aval et le débit. La fréquence de contrôle est à adapter en fonction des résultats sur les premiers mois d'exploitation.
- Vérifier périodiquement, au moins chaque trimestre, **l'état des tamis des filtres**.

- À chaque augmentation de **différence de pression** (en règle générale lorsque celle-ci dépasse 1 bar), nettoyer le panier, ce qui suppose l'isolement du filtre (bypass ou basculement sur un second filtre). Noter sur un cahier d'exploitation la description sommaire du contenu (nature des dépôts, couleur, quantité). Un échantillon peut être conservé dans un sachet avec les renseignements nécessaires : date, heure, filtre concerné.
- Après remise en place du panier, contrôler la perte de charge et noter les valeurs de pression amont et aval ainsi que le débit.
- Contrôler régulièrement, au moins une fois par trimestre, la validité des indications des **manomètres**, par exemple en comparant les indications aval (ou amont) de deux filtres en service et en aval - amont sur un filtre hors service.

A noter que le colmatage du filtre peut résulter d'un dimensionnement trop fin du tamis. Certains constructeurs d'échangeurs (surtout les échangeurs à plaques, moins pour les tubulaires) demandent des mailles très faibles, inférieures à 100 microns). Essayer des mailles plus larges : 250 à 500 µm ou placer plusieurs filtres à mailles décroissantes.

Si la fréquence de nettoyage est trop rapprochée, prévoir des filtres à nettoyage automatique : **rétro-lavage**. Moins il y a de marches-arrêts de la pompe, moins il y a, en général, de particules.

Le dispositif éventuel de traitement de l'eau

Ce dispositif n'existe que sur certaines installations. Le traitement de l'eau se limite ici au traitement **anti-corrosion-dépôt** et au traitement **bactéricide**. Les préconisations habituelles sont les suivantes :

- contrôler au moins une fois par semaine le dispositif de stockage (relevé du niveau dans les cuves). Un détecteur de niveau bas peut aussi être mis en place, avec émission d'une alarme indiquant qu'il faut rajouter du produit. Un deuxième détecteur (niveau très bas) peut arrêter l'installation s'il n'y a plus assez de produit ;
- contrôler une fois par mois, visuellement, l'absence de dépôts dans les cuves, l'état général des cuves, des pompes doseuses, des flexibles d'injection, des piquages de raccordement ;
- graisser chaque année les paliers des pompes doseuses ;
- à chaque arrêt prolongé de l'installation (pendant plus d'un mois), vidanger l'installation et la remplir avec l'eau du réseau ;
- contrôler, une fois par trimestre environ, la pression dans le tube de traitement en fond de puits lorsque ce dispositif existe.

Autres matériels

Contrôler au moins annuellement le bon fonctionnement des diverses **vannes**, des **pressostats**, des **sondes de température**.

En présence d'une **canalisation de rejet** vers un pluvial ou vers un fleuve, munie ou non d'un siphon, il convient de s'assurer de la compatibilité du matériau avec l'eau du

forage et avec l'encaissant sur lequel elle est posée. Vérifier périodiquement si des corrosions apparaissent ou si des dépôts obstruent progressivement la section (très souvent, la section est surdimensionnée, ce qui fait qu'on ne décèle pas rapidement la formation de dépôts).

Dispositions particulières à (aux) forage(s) d'injection

La diminution de la **capacité d'absorption** se traduit par une remontée du niveau d'eau ou par une augmentation de la **pression de réinjection**. Les préconisations sont exposées ci-après :

- Suivre régulièrement, chaque semaine, le **niveau d'eau dans le(s) forage(s)** pour détecter d'éventuelles pertes de charge supplémentaires. Noter le débit d'injection correspondant et, si l'injection n'est pas continue, la durée de l'injection au moment de la mesure. Dans les cas où l'injection se fait sous pression (charge d'eau plus haute que celle de la tête de forage, ce qui suppose que celle-ci soit étanche), il faut noter l'évolution des pressions à l'aide d'un manomètre en tête de forage. Il est utile de prévoir un passage avec presse-étoupe, dans la tête étanche, pour contrôler des niveaux dans certaines circonstances.
- Procéder, une fois par trimestre (au minimum, une fois par semestre, à un **contrôle des pertes de charge**. La fréquence est à adapter si une augmentation des pertes de charge est constatée. Le contrôle comprend la réalisation d'au moins **trois paliers de débit**, chacun d'une durée d'une heure, séparés par des redescentes du niveau de la nappe également d'une heure. Noter le niveau de l'eau au démarrage de chaque palier, pendant l'injection, pendant l'arrêt de l'injection et au moment de l'arrêt.
- **Empêcher tout déversement d'eau autre que celle du pompage**, notamment : eau pluviale, eau de ruissellement ou d'égouttage de parking (même souterrain), déversement de tout liquide. S'il y a une « pompe de décrassage » (dite aussi « pompe de rétro-lavage ») et un rejet de cette pompe vers un pluvial, un égout, s'assurer du bon fonctionnement du clapet anti-retour au moins deux fois par an.
- Ne pas réinjecter en nappe, de l'eau de forage de pompage qui aurait subi des **modifications chimiques ou bactériologiques**, afin de ne pas risquer de contaminer la nappe (obligation réglementaire). Eviter les points bas dans le réseau de canalisations de surface et l'eau stagnante dans ce circuit.
- Réaliser au moins une fois par semestre - la fréquence est à adapter en fonction des résultats - une **analyse des eaux réinjectées**. L'analyse porte sur les paramètres pouvant entraîner un colmatage de l'ouvrage : T, pH, Eh, matières en suspension, teneur en fer, carbonates, manganèse, sulfures, cations et anions totaux, conductivité, analyse bactériologique (ferro-bactéries, sulfato-bactéries, thio-sulfato-bactéries). En fonction du contexte et de l'évolution, l'analyse peut être allégée. Le prélèvement doit être fait dans les mêmes conditions à chaque visite : même durée d'injection, même débit. A noter que pour être représentatives, certaines mesures doivent être faites sur place (paramètres non conservatifs), comme Eh, pH, O₂ dissous, T. L'expérience montre aussi que l'analyse sur site du fer dissous et particulaire donne des résultants expliquant mieux le comportement

du forage que les analyses faites sur prélèvement envoyé au laboratoire. Dans le cas d'un fonctionnement alternatif, il semble qu'il y ait une tendance à l'augmentation des effets de corrosion et de dépôts. Il convient d'amplifier la fréquence des analyses physico-chimiques et bactériologiques.

Prévoir un **décolmatage régulier du forage** et pour cela deux attitudes existent :

- **Décolmatage fréquent**, par aversion du sens d'écoulement au moyen d'une **pompe de décrassage** (ou pompe de rétro-lavage) placée dans le forage d'injection. Celle-ci fonctionne une fois par semaine (cas le plus général) à une fois par mois, pendant une à quelques heures. Le rejet de cette pompe de décrassage se fait à l'égout, après accord du concessionnaire. La pompe de décrassage ne doit jamais dénoyer l'aquifère, même partiellement.
- **Décolmatage occasionnel**, en fonction de l'évolution des pertes de charge à la réinjection, par un **opérateur de servicing** qui réalise des pompages de développement, éventuellement un brossage de parois et un traitement chimique, avec une éventuelle stérilisation.

ANNEXE

Aspects réglementaires

Fiche I - Le Code minier

Titre Ier - Classification des gîtes de substances minérales

Art. 3 : « Sont également considérés comme mines, les gîtes renfermés dans le sein de la terre, dits **gîtes géothermiques**, dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et vapeurs souterraines qu'ils contiennent. Les gîtes géothermiques sont classés en **gîtes à haute température** et **gîtes à basse température**, selon les modalités définies par un décret en Conseil d'Etat. Les titres IV, VI bis, VI ter, VIII, IX et X du livre Ier du présent code s'appliquent à tous les gîtes géothermiques, quelle que soit leur température. En outre, les titres II et III s'appliquent aux gîtes à haute température, les articles 23 et 24 et le titre V aux gîtes à basse température. »

Titre IV - Exécution des travaux de recherche et d'exploitation de mines

Art. 70 : « Les puits, **sondages de plus de 100 m** et les galeries ne peuvent être ouverts dans un **rayon de 50 m** des habitations et des terrains compris dans les clôtures murées y attenantes, sans le consentement des propriétaires de ces habitations. »

Titre V - Gîtes géothermiques à basse température

Art 102 : « Des décrets en Conseil d'État fixent, en tant que de besoin, les conditions et modalités d'application du présent titre, et les cas où il peut y être dérogé en totalité ou partiellement pour des exploitations de minime importance, compte tenu de leur profondeur et de leur débit calorifique. »

Titre VIII - Déclarations de fouilles et de levées géophysiques

Art. 131 : « Toute personne exécutant un sondage, un ouvrage souterrain, un travail de fouille, quel qu'en soit l'objet, **dont la profondeur dépasse dix mètres** au-dessous de la surface du sol, **doit être en mesure de justifier que déclaration en a été faite** à l'ingénieur en chef des mines. »

Cette déclaration est adressée à la DRIRE par le propriétaire de l'ouvrage ou par la personne qu'il délègue, foreur ou bureau d'études hydrogéologiques. Elle est destinée à améliorer la connaissance et la gestion du sous-sol.

Art. 132 : « Les ingénieurs et techniciens du service des mines, les ingénieurs du service de conservation des gisements d'hydrocarbures, les ingénieurs du service géologique national ainsi que les collaborateurs de ce dernier qui sont munis d'un ordre de mission émanant du ministre chargé des mines ont accès à tous sondages, ouvrages souterrains ou travaux de fouilles soit pendant, soit après leur exécution, et quelle que soit leur profondeur. Ils peuvent se faire remettre tous échantillons et se faire communiquer tous les documents et renseignements d'ordre géologique,

géotechnique, hydrogéologique, hydrographique, topographique, chimique ou minier. Les maires dont le territoire est concerné par les fouilles seront informés des conclusions des recherches. »

Décret 78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherche et d'exploitation de géothermie

Article 17 : « Par exception aux dispositions de la présente section et par application de l'article 102 du Code minier, sont considérées comme **exploitations géothermiques à basse température de minime importance et dispensées de l'autorisation** de recherches et du permis d'exploitation prévus aux articles 98 et 99 du Code minier, les prélèvements de chaleur souterraine dont le débit calorifique maximal possible calculé par référence à une température de 20 degrés C est inférieur à 200 thermies par heure et dont la profondeur est inférieure à 100 m. Les exploitations de minime importance doivent être déclarées au chef du service interdépartemental de l'industrie et des mines par leur installateur selon les modalités prévues pour les déclarations de fouilles en application de l'article 131 du code minier. La déclaration est faite, au plus tard un mois avant la mise en service, par lettre recommandée avec demande d'avis de réception. Elle tient lieu de la déclaration prévue à l'article 131 du Code minier. »

En application du décret 93-743 du 29 mars 1993 rubrique 1.3.2. : « Travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques » c'est la procédure d'autorisation « loi sur l'eau » conforme au décret 93-742 du 29 mars 1993 qui s'applique.

Fiche II - Le Code de l'environnement (partie législative) livre II « Milieux physiques »

L'ordonnance n° 2000-914 du 18 septembre 2000, abroge un certain nombre de dispositions de nature législative qui sont remplacées par des dispositions équivalentes introduites dans le Code de l'environnement.

C'est notamment le cas des dispositions de la loi sur l'eau n° 92-3 du 03 janvier 1992, que l'on retrouve principalement dans le livre II « Milieux physiques » Titre I^{er} « Eau et milieux aquatiques ».

Dans le chapitre I^{er} « Régime général et gestion de la ressource » il est stipulé que :

Art. L. 211-1 : « Les dispositions de la loi ont pour objet une gestion équilibrée de la ressource en eau afin d'assurer préservation, protection, développement et valorisation des ressources et satisfaire ou concilier, lors des différents usages, les exigences de la santé, de la sécurité civile, de l'alimentation en eau potable des populations »

La police des eaux

Art. L. 211-2 : « Les règles générales de **préservation de la qualité** et de **répartition des eaux** sont déterminées par décret en Conseil d'Etat. Elles fixent les normes de qualité, les règles de répartition des eaux et les conditions dans lesquelles peuvent être :

- **interdits ou réglementés** les déversements, écoulements... et plus généralement tout fait susceptible d'altérer la qualité des eaux et du milieu aquatique,
- prescrites les mesures nécessaires pour préserver cette qualité et assurer la **surveillance des puits et forages** en exploitation ou désaffectés,
- effectués par le service chargé de la police des eaux, des **contrôles techniques** des installations, travaux ou opérations...

Art. L. 211-3 : « En complément des règles générales, des **prescriptions nationales ou particulières à certaines parties du territoire** sont fixées par décret en Conseil d'Etat. Elles déterminent les conditions dans lesquelles l'autorité administrative peut :

- **prendre des mesures de limitation ou de suspension provisoire des usages de l'eau** pour faire face à une menace ou aux conséquences d'accidents, de sécheresse, d'inondation ou à un risque de pénurie ;
- **édicter des prescriptions spéciales** applicables aux installations, travaux et activités qui font usage de l'eau... et les conditions dans lesquelles peuvent être **interdits ou réglementés tous forages, prises d'eau... ouvrages de rejet**, notamment dans les **zones de sauvegarde de la ressource**, déclarées d'utilité publique pour l'approvisionnement actuel ou futur en eau potable... ».

L'information au préfet et au maire

Art. L. 211-5 : « Le préfet et le maire intéressés doivent être informés dans les meilleurs délais... de tout **incident ou accident présentant un danger** pour la sécurité civile, la qualité, la circulation ou la conservation des eaux. La personne à l'origine de l'incident ou de l'accident et l'exploitant ou le propriétaire doivent prendre ou faire prendre toutes les mesures possibles pour mettre fin à la cause de danger ou d'atteinte au milieu aquatique... ».

La planification et la gestion de la ressource

Art. L. 212-1 : « Un ou des **schémas directeurs d'aménagement des eaux (SDAGE)** fixent pour chaque bassin ou groupement de bassins les **orientations fondamentales d'une gestion équilibrée** de la ressource en eau. Les programmes et décisions administratives dans le domaine de l'eau doivent être **compatibles ou rendues compatibles** avec leurs dispositions ».

Art. L. 212-3 : « Dans un sous-bassin ou un groupement de sous-bassins correspondant à une unité hydrographique ou un système aquifère, un **schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE)**, fixe les **objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur et de protection quantitative et qualitative des ressources** en eau superficielle et souterraine... ».

Art. L. 211-6 : « Lorsque le schéma a été approuvé, les décisions prises dans le domaine de l'eau par les autorités administratives et applicables dans le périmètre qu'il définit doivent être **compatibles ou rendues compatibles** avec ce schéma ».

Les régimes d'autorisation ou de déclaration

Art. L. 214-1 : « Sont soumis aux dispositions des articles L. 214-2 à L. 214-6 les installations ne figurant pas à la nomenclature des installations classées, les ouvrages, travaux et activités réalisés à des fins non domestiques..., entraînant des **prélèvements sur les eaux superficielles ou souterraines restituées ou non**, une modification du niveau ou du mode d'écoulement des eaux ou des déversements, écoulements, rejets ou dépôts directs ou indirects, chroniques ou épisodiques, même non polluants ».

Art. L. 214-2 « Les installations, ouvrages, travaux et activités visés à l'article L. 214-1, sont définis dans une **nomenclature** établie par décret en conseil d'Etat..., et soumis à **autorisation ou à déclaration** suivant les dangers qu'ils présentent et la gravité de leurs effets sur la ressource en eau... Ce décret définit en outre les critères de **l'usage domestique**, et notamment le **volume d'eau** en deçà duquel le prélèvement est assimilé à un tel usage, ainsi que les autres formes d'usage dont l'impact sur le milieu aquatique est trop faible pour justifier qu'elles soient soumises à autorisation ou à déclaration ».

Art. L. 214-3 : « Sont **soumis à autorisation** de l'autorité administrative les installations, ouvrages, travaux et activités susceptibles de présenter des dangers pour la santé et la sécurité publique, de nuire au libre écoulement des eaux, de réduire la

ressource en eau..., de porter atteinte gravement à la qualité ou la diversité du milieu aquatique. Sont **soumis à déclaration** les installations, ouvrages, travaux et activités qui, n'étant pas susceptibles de présenter de tels dangers, doivent néanmoins respecter les prescriptions édictées en application des articles L. 211-2 et L. 211-3. Si les principes mentionnés à l'article L. 211-1 ne sont pas garantis par l'exécution de ces prescriptions, l'autorité administrative peut imposer, par arrêté, toutes **prescriptions spécifiques** nécessaires. Les prescriptions nécessaires à la protection des principes mentionnés à l'article L. 211-1, les moyens de surveillance, les modalités des contrôles techniques et les moyens d'intervention en cas d'accident sont fixés par **l'arrêté d'autorisation** et, éventuellement, par des **actes complémentaires** pris postérieurement à cette autorisation. Un décret détermine les conditions dans lesquelles les prescriptions visées aux deux alinéas précédents sont établies, modifiées et portées à la connaissance des tiers »

Art. L. 214-4 : « L'autorisation est accordée après **enquête publique** et, le cas échéant, pour une **durée déterminée**. Elle peut être renouvelée sans enquête publique préalable suivant les conditions établies par décret. Enfin, **l'autorisation peut être retirée ou modifiée**, notamment lorsque les ouvrages ou installations sont abandonnés ou ne font plus l'objet d'un entretien régulier »

Art. L. 214-8 : « Les installations soumises à autorisation ou à déclaration au titre des articles L. 214-1 à L. 214-6 permettant d'effectuer à des fins non domestiques des prélèvements en eau superficielle ou des déversements, ainsi que toute **installation de pompage des eaux souterraines**, doivent être pourvues des **moyens de mesure ou d'évaluation appropriés**. Leurs exploitants ou, s'il n'existe pas d'exploitants, leurs propriétaires sont tenus d'en assurer la **pose** et le **fonctionnement**, de conserver trois ans les **données** correspondantes et de tenir celles-ci à la disposition de l'autorité administrative ainsi que des personnes morales de droit public dont la liste est fixée par décret...

Fiche III - Procédures d'autorisation et de déclaration Décret n° 93-742 du 29 mars 1993 modifié⁷

Dispositions applicables aux opérations soumises à autorisation

Art. 2 : Toute **demande d'autorisation** doit être adressée au préfet. Cette demande, remise en sept exemplaires, comprend notamment :

- Le nom et l'adresse du demandeur,
- L'emplacement de l'opération projetée...
- La nature, la consistance et l'importance de l'ouvrage, de l'installation... ainsi que la ou les rubriques de la nomenclature dans lesquelles ils doivent être rangés,
- Un **document d'incidence** de l'opération sur les ressources en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux... L'étude d'impact ou la notice d'impact se substitue au document d'incidence,
- Les moyens de surveillance prévus et les moyens d'intervention en cas d'incident ou d'accident si l'opération présente un danger,
- Les documents cartographiques pour la compréhension des pièces du dossier.

Art. 3 : La réception et la transmission de la demande au sein de l'administration suivent une procédure.

Art. 4 : Dès que le dossier de demande d'autorisation est **jugé recevable**, il est soumis à **enquête publique**.

Art. 5 : Le **conseil municipal** de la commune est appelé à donner son avis.

Art. 6 : Le dossier est communiqué pour information au président de la **Commission Locale de l'Eau (CLE)** et pour avis s'il y a lieu, à la **personne publique gestionnaire du domaine public**.

Art. 7 : Le dossier fait l'objet d'un rapport présenté au **Conseil Départemental d'Hygiène (CDH)**, avec les propositions concernant soit le refus de la demande, soit les prescriptions envisagées. Le pétitionnaire a la faculté de se faire entendre par le conseil ou de désigner à cet effet un mandataire.

Art. 8 : Le projet d'arrêté statuant sur la demande est porté à la connaissance du pétitionnaire qui dispose d'un délai de 15 jours pour formuler par écrit ses observations

⁷ Article 1 modifié par décret 99-782 du 9 septembre 1999
Article 3 modifié par décret 2002-89 du 16 janvier 2002
Article 4 modifié par décret 95-1204 du 6 novembre 1995
Article 13 modifié par décret 2002-89 du 16 janvier 2002
Article 40 modifié par décret 2001-189 du 23 février 2001
Article 41 modifié par décret 99-736 du 27 août 1999

au préfet. Le préfet statue dans un délai de trois mois... En cas d'impossibilité de statuer, le préfet dispose d'un délai supplémentaire de deux mois.

Art. 10 : « Si plusieurs ouvrages... doivent être réalisés par la même personne, sur le même site, une seule demande d'autorisation peut être présentée pour l'ensemble des installations. Il est procédé à une seule enquête et **un seul arrêté peut statuer sur l'ensemble** et fixer les prescriptions prévues à l'article 13. Il en est obligatoirement ainsi quand il s'agit d'un ensemble d'ouvrages, d'installations, de travaux ou d'activités dépendant d'une même personne, d'une même exploitation ou d'un même établissement et concernant le même milieu aquatique, si cet ensemble dépasse le seuil fixé par la nomenclature des opérations soumises à autorisation... ».

Art. 11 : « La réalisation de l'ouvrage... avant l'intervention de l'arrêté préfectoral, entraîne obligatoirement le **rejet de la demande d'autorisation** en cas d'avis défavorable du conseil départemental d'hygiène ».

Art. 12 : « En cas de rejet de la demande, la décision est prise par arrêté préfectoral motivé ».

Art. 13 : « Les conditions de réalisation, d'aménagement et d'exploitation des ouvrages ou installations, d'exécution des travaux ou d'exercice de l'activité doivent satisfaire aux **prescriptions** fixées par **l'arrêté d'autorisation** et, le cas échéant, par les **arrêtés complémentaires**. » Ces prescriptions tiennent compte des intérêts à **préserver la ressource**, (explicités par les SDAGE et SAGE), notamment pour l'alimentation en eau potable des populations et satisfaire ou concilier différents usages. Pour les installations soumises à des règles techniques fixées par arrêté ministériel, l'arrêté d'autorisation peut créer des **modalités d'application particulières** de ces règles. L'arrêté d'autorisation fixe la **durée de validité** de celle-ci. Il fixe les **moyens d'analyse, de mesure et de contrôle** de l'ouvrage, de l'installation ainsi que les conditions dans lesquelles leurs **résultats sont portés à la connaissance**. Il fixe en outre, s'il y a lieu, les **moyens d'intervention** en cas d'incident ou d'accident...

Art. 14 : Des arrêtés complémentaires peuvent fixer des **prescriptions additionnelles** ou atténuer des prescriptions primitives dont le maintien n'est plus justifié.

Art. 15 : « Toute **modification** apportée par le bénéficiaire de l'autorisation à l'ouvrage... et de nature à entraîner un changement notable des éléments du dossier de demande d'autorisation, doit être portée, avant sa réalisation, à la connaissance du préfet avec tous les éléments d'appréciation... ».

Art. 16 : L'information aux tiers est assurée suivant plusieurs modalités.

Art. 17 à 22 : Le **renouvellement de l'autorisation** est soumis à une nouvelle demande et aux mêmes formalités que les demandes initiales, à l'exception de l'enquête publique. Des conditions de délais et des **autorisations temporaires** sont prévues.

Art. 23 à 28 : Le **retrait de l'autorisation** fait l'objet d'un dossier préalable et d'une **procédure de suppression** de l'ouvrage ou de l'installation

Dispositions applicables aux opérations soumises à déclaration

Art. 29 : Toute personne souhaitant réaliser une installation, un ouvrage, des travaux ou une activité soumise à déclaration adresse une **déclaration** au préfet du département. Cette déclaration, remise en **trois exemplaires**, comprend notamment :

- le nom et l'adresse du demandeur,
- l'emplacement de l'opération projetée,
- la nature, la consistance et l'importance de l'ouvrage, de l'installation... ainsi que la ou les rubriques de la nomenclature dans lesquelles ils doivent être rangés,
- un **document d'incidence** de l'opération sur les ressources en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux, tenant compte des variations saisonnières et climatiques... L'étude d'impact ou la notice d'impact se substitue au document d'incidence,
- les moyens de surveillance ou d'évaluation des prélèvements et des déversements prévus,
- les documents cartographiques pour la compréhension des pièces du dossier.

Art. 30 : « Le préfet donne **récépissé** de la déclaration et communique au déclarant une copie des **prescriptions générales** applicables à l'ouvrage, à l'installation, aux travaux ou à l'activité... » L'ensemble fait l'objet de mesures de publicité.

Art. 32 : A la demande du déclarant le préfet peut statuer par arrêté. Des prescriptions complémentaires peuvent être fixées après avis du **conseil départemental d'hygiène (CDH)**.

Art. 33 : « Toute **modification** apportée par le déclarant à l'ouvrage, l'installation, à son mode d'utilisation, à la réalisation des travaux ou à l'aménagement en résultant... et de nature à entraîner un changement notable des éléments du dossier de déclaration initiale doit être portée avant sa réalisation à la connaissance du préfet, qui peut exiger une nouvelle déclaration... »

Le régime de déclaration n'est pas un régime de simple « enregistrement ». Une circulaire ministérielle rappelle que les installations, ouvrages, travaux, activités soumis à déclaration doivent respecter les prescriptions générales de la loi sur l'eau, notamment les principes mentionnés à l'ancien article 2.

Dispositions communes aux opérations soumises à autorisation ou à déclaration

Art. 35 : Le bénéfice de l'autorisation ou de la déclaration est **transmissible à un tiers**, sous réserve que le nouveau bénéficiaire en fasse la déclaration au préfet dans un délai de trois mois. La **cessation** définitive ou pour une période supérieure à deux ans, de l'exploitation ou de l'affectation d'un ouvrage doit faire l'objet d'une **déclaration auprès du préfet**.

Art. 36 : Tout incident ou accident intéressant une installation, un ouvrage... doit être déclaré au maire et au préfet dans les conditions de l'article 18 de la loi sur l'eau.

Art. 37 : « Le préfet peut décider que la remise en service d'un ouvrage, d'une installation... momentanément hors d'usage pour une raison accidentelle, sera subordonnée, selon le cas, à une nouvelle autorisation ou à une nouvelle déclaration... ».

Art. 38 : « En cas de retrait ou de suspension d'autorisation ou de mesure d'interdiction d'utilisation, de mise hors service ou de suppression, l'exploitant ou, à défaut, le propriétaire de l'ouvrage... est tenu d'assurer la surveillance de l'ouvrage... ».

Art. 39 : Les analyses et contrôles qui peuvent être prescrits en application du décret, sont réalisés par des laboratoires et organismes agréés par le ministre chargé de l'environnement.

Art. 40 : Les autorisations délivrées en application de décrets antérieurs valent autorisations délivrées en application de l'article 10 de la loi sur l'eau. « Leur renouvellement éventuel s'effectue dans les conditions fixées aux articles 23 du décret n° 82-842 du 29 septembre 1982 et 17 à 29 du présent décret. ».

Art. 42 : « Lorsque les conditions dont sont assortis une autorisation ou un récépissé de déclaration doivent être rendues compatibles avec un SDAGE ou un SAGE, les prescriptions sont arrêtées dans les conditions prévues aux articles 14 ou 32. ».

Art. 44 : Les actes et omissions sont sanctionnés.

Fiche IV - Nomenclature des installations, ouvrages, travaux et activités soumis à autorisation ou à déclaration Décret n° 93-743 du 29 mars 1993 modifié⁸

Art. 2 : « Les installations, ouvrages, travaux et activités soumis à déclaration par la nomenclature annexée au décret relèvent du **régime de l'autorisation, à l'intérieur du périmètre de protection rapprochée des points de prélèvements d'eau destinée à l'alimentation des collectivités humaines...** » et à l'intérieur « du **périmètre de protection des sources d'eaux minérales** déclarées d'intérêt public... »

Art. 3 : « Constituent un **usage domestique de l'eau**... les prélèvements et les rejets destinés exclusivement à la satisfaction des besoins des personnes physiques propriétaires ou locataires des installations et de ceux des personnes résidant habituellement sous leur toit... Est assimilé à un usage domestique de l'eau tout prélèvement inférieur ou égal à **40 mètres cubes d'eau par jour ...** »

Principales rubriques de l'annexe « Eaux souterraines » modifiée⁹ :

1.1.0 « Installations, ouvrages, travaux permettant le **prélèvement dans un système aquifère** autre qu'une **nappe d'accompagnement d'un cours d'eau**, si le débit total est:

- **supérieur ou égal à 80 m³/h : autorisation,**
- **supérieur à 8 m³/h, mais inférieur à 80 m³/h : déclaration. »**

Dans l'attente d'une définition nationale des nappes d'accompagnement et d'une éventuelle modification de la réglementation, le groupe de travail mis en place par la direction de l'eau a proposé la définition provisoire suivante : « **une nappe d'accompagnement est la ressource souterraine en connexion hydraulique avec le cours d'eau et dont le prélèvement a une incidence sur le débit de ce cours d'eau** ».

Les seuils (8 m³/h et 80 m³/h) sont déterminés par la capacité de prélèvements et non par le débit moyen d'utilisation. Par exemple, l'installation avec une pompe installée de 90 m³/h sera soumise à autorisation, même si le débit moyen est de 60 m³/h.

1.2.0 « **Rejets d'effluents sur le sol ou dans le sous-sol**, à l'exclusion des bassins d'infiltration visés à la rubrique 5.3.0, de l'épandage visé à la rubrique 5.4.0, ainsi que des réinjections visées à la rubrique 1.3.1 : **autorisation** ».

1.3.1 « **Réinjection dans une même nappe** des eaux prélevées pour la géothermie, l'exhaure des mines et carrières ou lors des travaux de génie civil, la capacité totale de réinjection étant :

- **supérieure ou égale à 80 m³/h : autorisation**

⁸ Article 2 modifié par décret 94-1227 du 26 décembre 1994

⁹ Modifiée par décret 2001-205 du 6 mars 2001

- **supérieure à 8 m³/h, mais inférieure à 80 m³/h : déclaration** ».

1.3.2 « Travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques : **autorisation** ».

1.5.0 « Ouvrages, installations, travaux qui étaient soumis à autorisation en application du **décret-loi du 8 août 1935** et des décrets qui en ont étendu le champ d'application » : **autorisation**.

Principales rubriques de l'annexe « **Eaux superficielles** » modifiée¹⁰

Le débit de référence du cours d'eau s'entend comme le **débit moyen mensuel sec** de récurrence 5 ans.

2.1.0 « ...prélèvement et installations et ouvrages permettant le prélèvement, y compris par dérivation, dans un cours d'eau, **dans sa nappe d'accompagnement** ou dans un plan d'eau ou canal alimenté par ce cours d'eau ou cette nappe d'un débit total :

- **égal ou supérieur à 5 % du débit** ou à défaut du débit global d'alimentation du canal ou du plan d'eau : **autorisation**,
- **compris entre 2 et 5 % du débit** ou à défaut du débit global d'alimentation du canal ou du plan d'eau : **déclaration** ».

2.1.1 « Prélèvements et installations et ouvrages permettant le prélèvement, dans un cours d'eau, **sa nappe d'accompagnement** ou un plan d'eau ou canal alimenté par ce cours d'eau ou cette nappe, lorsque le débit du cours d'eau en période d'étiage résulte, pour **plus de la moitié**, d'une **réalimentation artificielle** : **autorisation**. Toutefois, en ce qui concerne la Seine et la Loire, il n'y a lieu à autorisation que lorsque la capacité du prélèvement est supérieure à 80 m³/h »

2.2.0 « Rejet dans les eaux superficielles susceptibles de modifier le régime des eaux, la capacité totale de rejet étant :

- supérieure ou égale à 10 000 m³/j ou à 25 % du débit : **autorisation**,
- supérieure à 2 000 m³/j ou à 5 % du débit mais inférieure à 10 000 m³/j et à 25 % du débit : **déclaration** ».

Principale rubrique de l'annexe « **Milieux aquatiques en général** » modifiée

4.3.0 « A l'exception des prélèvements faisant l'objet d'une convention avec l'attributaire du débit affecté prévu par l'article 15 de la loi sur l'eau, ouvrages, installations, travaux permettant un prélèvement total d'eau dans une zone où des **mesures permanentes de répartition quantitative** instituée, notamment au titre de l'article 8-2° de la loi du 3 janvier 1992 sur l'eau, ont prévu **l'abaissement des seuils** :

1° **Capacité supérieure ou égale à 8 m³/h** : **autorisation**

2° Dans les autres cas : **déclaration** ».

¹⁰ Modifiée par décret 2002-202 du 13 février 2002

**Fiche V - Autorisation préalable pour tout forage
au-delà de 80 m de profondeur dans
les départements de l'Ile-de-France
Décret-loi du 8 août 1935**

Le décret-loi du 8 août 1935, abrogé par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 (article 46), s'appliquait aux départements de l'Ile-de-France. Il fixait un **seuil de 80 m de profondeur** au-delà duquel la réalisation d'un forage devait être autorisée. Il stipulait (art. 1) : « En raison de l'intérêt public qui s'attache à la conservation et à l'utilisation rationnelle des ressources en eaux souterraines, aucun puits ou sondage de plus de **80 m de profondeur** ne pourra être entrepris, dans les départements de la Seine, de Seine-et-Oise et de Seine-et-Marne, sans **autorisation préalable** ».

Selon la **rubrique 1.5.0** du décret 93-743 du 29 mars 1993, les « Ouvrages, installations, travaux **qui étaient soumis à autorisation** en application du décret-loi du 8 août 1935 et des décrets qui en ont étendu le champ d'application » sont soumis à la **procédure d'autorisation** prévue en application de la loi sur l'eau.

Ainsi le décret-loi du 8 août 1935 est abrogé mais **son contenu est applicable** en raison de la rubrique 1.5.0 du décret 93-743 du 29 mars 1993.

Fiche VI - Zones de répartition des eaux Décret n° 94-354 du 29 avril 1994

Art. 1 : « Afin de faciliter la conciliation des intérêts des différents utilisateurs de l'eau dans les **zones présentant une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins**, il est créé des **zones de répartition des eaux** comprenant les bassins, sous-bassins et fractions de sous-bassins hydrographiques et les systèmes aquifères figurant dans la liste annexée au présent décret. »

Art. 2 : « Dans chaque département concerné, la liste des communes incluses dans une zone de répartition des eaux est constatée par arrêté préfectoral publié au recueil des actes administratifs de la préfecture. »

Art. 3 : « **Les seuils d'autorisation ou de déclaration fixés à la rubrique 4.3.0 de la nomenclature** annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993 susvisé sont applicables aux ouvrages, installations et travaux permettant un prélèvement dans les zones de répartition des eaux. »

Dans les zones de répartition, **les captages dont le débit est supérieur ou égal à 8 m³/h doivent faire l'objet d'une autorisation préalable**. Les zones de répartition des eaux (y compris souterraines), par bassins, mentionnées dans le décret 94-354 du 29 avril 1994 seront prochainement enrichies. En effet un projet de décret sur les nouvelles zones de répartition est actuellement en cours d'examen en Conseil d'Etat. Il devrait notamment inclure les **nappes de l'Albien et du Néocomien du Bassin parisien ainsi que la nappe de Beauce**. Sa parution est attendue au cours du deuxième semestre 2003.

Fiche VII - Code général des collectivités territoriales (partie législative) Article L. 2223-5

« Nul ne peut, sans autorisation, élever aucune habitation ni creuser **aucun puits à moins de 100 m** des nouveaux cimetières transférés hors des communes.

Les bâtiments existants ne peuvent être ni restaurés ni augmentés sans autorisation. Les puits peuvent, après visite contradictoire d'experts, être comblés par décision du représentant de l'État dans le département. »

Fiche VIII - Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles Code de l'environnement (partie législative) Chapitre II : Article L. 562-1

« I - L'Etat élabore et met en application des plans de prévention des risques naturels prévisibles tels que **les inondations, les mouvements de terrain**, les avalanches, les incendies de forêt, les séismes, les éruptions volcaniques, les tempêtes ou les cyclones.

II - Ces plans ont pour objet, en tant que de besoin :

1° De **délimiter les zones exposées aux risques** en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru, **d'y interdire tout type de construction, d'ouvrage, d'aménagement** ou d'exploitation agricole, forestière, artisanale, commerciale ou industrielle ou, dans le cas où des constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles pourraient y être autorisés, **prescrire les conditions** dans lesquelles ils doivent être réalisés, utilisés ou exploités.

2° De délimiter les zones qui ne sont pas directement exposées aux risques mais où des constructions, des ouvrages, des aménagements ou des exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles **pourraient aggraver** des risques ou en provoquer de nouveaux et y prévoir des mesures d'interdiction ou des prescriptions telles que prévues au 1°.

3° De **définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde** qui doivent être prises, dans les zones mentionnées au 1° et au 2°, par les collectivités publiques dans le cadre de leurs compétences, ainsi que celles qui peuvent incomber aux particuliers.

4° De définir, dans les zones mentionnées au 1° et au 2°, les mesures relatives à l'aménagement, l'utilisation ou l'exploitation des constructions, des ouvrages, des espaces mis en culture ou plantés existants à la date de l'approbation du plan qui doivent être prises par les propriétaires, exploitants ou utilisateurs.

.... »

Il peut y avoir interdiction ou limitation d'usage de l'eau, de choix de l'aquifère ou de débit pour tout nouveau projet de forage. Certains PPR interdisent les forages, par exemple s'il y a risque de dissolution de gypse et d'effondrement. Les PPR approuvés par arrêté préfectoral après avis des conseils municipaux concernés et enquête publique valent servitude d'utilité publique. Ils sont alors opposables aux tiers.

Fiche IX - Prélèvements et consommation d'eau à l'intérieur d'une ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) Arrêté du 2 février 1998

Dans la législation applicable aux opérations relevant des installations classées pour la protection de l'environnement, les forages en eux-mêmes ne font pas l'objet d'une rubrique de la nomenclature des installations classées. Toutefois ces forages sont considérés comme des ouvrages connexes des activités soumises à autorisation ou déclaration.

L'autorisation d'exploiter délivrée au titre de la législation des installations classées vaut autorisation au titre de la loi sur l'eau.

En matière de prélèvements et de consommation d'eau, les prescriptions générales minimales applicables pour la majorité des installations soumises à autorisation font l'objet de l'arrêté du 2 février 1998 (articles 14 à 17).

Art. 14 – « L'exploitant prend toutes les dispositions nécessaires dans la conception et l'exploitation des installations pour limiter les flux d'eau. Notamment la réfrigération en circuit ouvert est interdite sauf autorisation explicite par l'arrêté préfectoral.

L'arrêté d'autorisation fixe si nécessaire plusieurs niveaux de prélèvements (quantités maximales instantanées et journalières) dans les eaux souterraines et superficielles, notamment afin de faire face à une menace ou aux conséquences d'accidents, de sécheresse, d'inondation, ou à un risque de pénurie, parallèlement aux mesures prises pour d'autres catégories d'installations en application du décret n° 92-1041 du 24 septembre 1992 relatif à la limitation ou à la suspension provisoire des usages de l'eau. Cette limitation ne s'applique pas au réseau d'incendie.

Les niveaux de prélèvement prennent en considération l'intérêt des différents utilisateurs de l'eau, en particulier dans les zones de répartition des eaux définies en application du décret n° 94-354 du 29 avril 1994. Ils sont compatibles avec les dispositions du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux et du schéma d'aménagement et de gestion des eaux, lorsqu'il existe. »

Art. 15 – « Les installations de prélèvement d'eau sont munies d'un dispositif de mesure totalisateur. Ce dispositif est relevé journalièrement si le débit prélevé est susceptible de dépasser 100 m³/j, hebdomadairement si ce débit est inférieur. Ces résultats sont portés sur un registre éventuellement informatisé. »

Art. 16 – « L'arrêté d'autorisation fixe, en tant que de besoin, les dispositions à prendre pour la réalisation et l'entretien des ouvrages de prélèvement.

En cas de raccordement, sur un réseau public ou sur un forage en nappe, l'ouvrage est équipé d'un dispositif de disconnexion.

Les ouvrages de prélèvement dans les cours d'eau ne gênent pas le libre écoulement des eaux. Lorsqu'ils doivent être construits dans le lit du cours d'eau, ils respectent, sans préjudice de l'autorisation éventuellement requise en application de l'article L. 232-3 du Code rural, les dispositions des articles L. 232-5 et L. 232-6 dudit code. Leur mise en place est compatible avec les dispositions du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux et du schéma d'aménagement et de gestion des eaux, lorsqu'il existe. »

Art. 17 – « Lors de la réalisation de forages en nappe, toutes dispositions sont prises pour éviter de mettre en communication des nappes d'eau distinctes, sauf autorisation explicite dans l'arrêté d'autorisation, et pour prévenir toute introduction de pollution de surface, notamment par un aménagement approprié vis-à-vis des installations de stockage ou d'utilisation de substances dangereuses.

En cas de cessation d'utilisation d'un forage, l'exploitant prend les mesures appropriées pour l'obturation ou le comblement de cet ouvrage afin d'éviter la pollution des nappes d'eau souterraines.

La réalisation de tout nouveau forage ou la mise hors service d'un forage est portée à la connaissance du préfet avec tous les éléments d'appréciation de l'impact hydrogéologique ».

Centre scientifique et technique
Service connaissance et diffusion de l'information géologique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34