

DOCUMENT PUBLIC

***Réhabilitation d'ouvrages de captage d'eau
en région Centre
pour la mise en conformité et
comblement d'ouvrages***

Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 2002-EAU-508

Ph. Maget

**octobre 2002
BRGM/RP-51790-FR**



Mots clés : Réhabilitation, Comblement, Ouvrages de captage, Puits, Forages, Région Centre.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Maget Ph. (2002) - Réhabilitation d'ouvrages de captage d'eau en région Centre pour la mise en conformité et comblement d'ouvrages. BRGM/RP-51790-FR. 49 p., 14 fig., 1 ann.

© BRGM, 2002, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La réhabilitation d'un ouvrage répond habituellement au besoin d'amélioration de la productivité d'un captage obstrué ou d'une réparation d'un forage « lourd ». Mais depuis la loi sur l'eau, de nombreuses demandes concernent la mise en conformité d'ouvrages simples (puits et forages agricoles) pour répondre à la réglementation, à savoir essentiellement la protection contre les infiltrations d'eau de surface et la nécessité de ne pas mélanger deux nappes de caractéristiques différentes.

La documentation existante concernant la réhabilitation est assez abondante, mais ne répond pas aux besoins spécifiques de la région. C'est pourquoi la MISE du Loiret et la DIREN ont demandé au BRGM, dans le cadre de l'opération de Service public « appui scientifique et technique aux Services chargés de la Police de l'Eau », d'établir un *document technique sur la réhabilitation d'ouvrages, dans le contexte du département et des besoins actuels, à savoir leur réhabilitation ou leur comblement pour répondre aux règles du SDAGE ou aux prescriptions dans les périmètres de protection (opération référencée 02 EAU 508)*.

Pour les ouvrages en nappe phréatique, libre ou captive, (puits et forages), la réhabilitation concerne principalement l'aménagement de la tête de puits pour éviter toute infiltration directe des eaux de ruissellement le long de la colonne de captage.

Dans le cas de deux nappes superposées de caractéristiques différentes -d'un point de vue hydraulique ou de qualité de l'eau- le forage ne doit en aucun cas permettre le mélange des nappes. Le comblement de la partie inférieure ne pose pas de problème, à la condition que le potentiel de la nappe supérieure reste suffisant pour l'utilisateur. L'occultation de l'aquifère supérieur pollué pour ne capter que la nappe inférieure est par contre du domaine théorique et est pratiquement et économiquement impossible.

Dernier stade de la mise en conformité d'un ouvrage, lorsqu'une réhabilitation se révèle impossible ou aléatoire techniquement ou financièrement, le comblement de l'ouvrage s'impose. Il doit cependant répondre à un programme précis afin d'éviter les infiltrations derrière le tube de soutènement ou la paroi du puits.

Toutes ces opérations nécessitent au préalable un diagnostic précis, d'une part par reconstitution de la coupe géologique -si elle n'existe pas initialement- d'autre part par des investigations dans l'ouvrage (diagraphie, caméra-vidéo, analyses de l'eau,...) afin de rendre la réhabilitation ou le comblement efficace.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Justification d'une réhabilitation	9
2.1. Ouvrage non conforme	9
2.1.1. Ouvrage non conforme à la réglementation	9
2.1.2. Ouvrage non conforme aux règles de l'Art	10
2.2. Ouvrage endommagé	10
2.2.1. Tête de captage	11
2.2.2. Tube et cimentation	11
2.2.3. Partie captante	11
3. Démarches	13
3.1. Constat, symptômes	13
3.2. Diagnostic	13
3.3. Réhabilitation	13
3.4. Contrôles	14
4. Critères de réhabilitation	15
4.1. Contexte hydrogéologique	15
4.1.1. Nappe libre	15
4.1.2. Nappe unique captive	15
4.1.3. Deux nappes superposées	16
4.2. Nature de l'ouvrage	17
4.2.1. Puits	17
4.2.2. Forages	18
5. Types de réhabilitation	19

5.1. Traitements	19
5.2. Transformations.....	19
6. Réhabilitation en nappe libre	21
6.1. Puits	21
6.2. Forage	22
6.3. Forage dans un puits	23
7. Réhabilitation en nappe unique captive	25
7.1. Puits	25
7.2. Forage	26
8. Réhabilitation en nappes superposées	27
8.1. Captage de la nappe supérieure	27
8.2. Captage de la nappe inférieure	30
9. Aménagement de tête de forage	33
9.1. Aménagement hors sol	33
9.2. Tête de puits dans une cave	33
9.3. Équipement d'exhaure.....	35
10. Comblement	39
10.1. Puits en nappe libre.....	39
10.2. Forage en nappe unique captive	40
10.3. Forage en nappes superposées.....	41

11. Conclusion	43
Bibliographie	45
Ann. 1 - Schéma-organigramme synthétique	47

Liste des figures

Fig. 1 - Contexte hydrogéologique des nappes aquifères	16
Fig. 2 - Réhabilitation en nappe libre : puits.....	21
Fig. 3 - Réhabilitation en nappe libre : forage.	22
Fig. 4 - Réhabilitation en nappe libre : forage dans un puits.	24
Fig. 5 - Réhabilitation en nappe unique captive : puits.....	26
Fig. 6 - Conception d'un forage captant la nappe inférieure.	28
Fig. 7 - Captage de la nappe supérieure.....	29
Fig. 8 - Captage de la nappe inférieure.....	30
Fig. 9 - Aménagement minimal d'une tête de forage.	33
Fig. 10 - Aménagement d'une tête de puits dans une cave.....	34
Fig. 11 - Aménagement d'exhaure.....	36
Fig. 12 - Puits.....	39
Fig. 13 - Forage en nappe unique captive.	40
Fig. 14 - Forage captant deux nappes.	42

1. Introduction

La question de réhabiliter un ouvrage de captage d'eau s'est toujours posée lorsque cet ouvrage présentait des signes d'endommagement se traduisant soit par une diminution de la productivité, soit par une dégradation de la qualité de l'eau. Les ouvrages concernés sont des sources captées, des puits ou des forages.

- Pour les sources, la réhabilitation concerne l'amélioration des aménagements de l'exutoire, essentiellement pour éviter des pollutions ou pour faciliter le prélèvement par pompage en créant une vasque profonde.
- En ce qui concerne les puits, on ne parle pratiquement jamais de réhabilitation, sauf pour un approfondissement lorsque le puits s'assèche trop souvent.
- Pour les forages, une réhabilitation consiste le plus souvent en une amélioration de la productivité par nettoyage ou traitement de la partie captante, ou en une réparation par une intervention lourde telle un rechemisage de tubes pour les ouvrages dont le produit est de très grande valeur (hydrocarbures, géothermie, quelques forages d'eau potable profonds dans des régions pauvres en ressource superficielle).

La réhabilitation est considérée maintenant sous un jour nouveau, depuis la loi sur l'Eau de 1992, et concerne en principe tous les forages et en particulier les forages « ordinaires » réalisés pour l'agriculture ou pour les particuliers et même les puits traditionnels. Il s'agit de mettre l'ouvrage en conformité avec la réglementation, qu'elle dépende d'un SDAGE, d'un périmètre de protection, etc.

Les demandes de réhabilitation d'un ouvrage se sont donc multipliées ces dernières années. Leur mise en application est cependant retardée pour de multiples raisons :

- procédure destinée à obliger un maître d'ouvrage à réhabiliter son captage mal définie ;
- problème de financement (qui doit payer ?), surtout en regard des faibles moyens des personnes concernées ;
- données techniques insuffisantes pour établir un programme de réhabilitation (absence de coupe géologique et coupe technique de l'ouvrage) ;
- absence de cahier des charges type pour une réhabilitation.

Cette dernière raison engendre un afflux de demandes auprès du BRGM et d'autres organismes, auxquelles il faut répondre au cas par cas. Il existe bien des documents méthodologiques, mais ils concernent essentiellement les actions au niveau des crépines pour améliorer la productivité de l'ouvrage et -en ce qui concerne les réparations- les forages lourds, mettant en œuvre des méthodes complexes, coûteuses, qui restent hors de proportion pour les ouvrages « ordinaires » que l'on vient de citer. Une journée d'information a été organisée par le BRGM en 2000, à Orléans ; elle a bien révélé la

situation actuelle : l'absence d'expérience en ce domaine, mis à part quelques applications simples dans certaines régions (Sud de la Vendée, ...).

A la demande de la MISE du Loiret, et dans le cadre de l'opération de Service public « appui scientifique et technique aux Services chargés de la Police de l'Eau », le BRGM, Service Géologique Régional/Centre, a donc été chargé d'établir un document technique sur la réhabilitation d'ouvrages, dans le contexte départemental et des besoins actuels.

Il n'est pas envisagé dans cette étude de reprendre les actions d'amélioration de productivité, ni des méthodes « lourdes » de réparation décrites dans les ouvrages existants, lesquelles sont cités en bibliographie. Nous nous consacrerons aux ouvrages « simples », répondant au contexte local : les puits et les forages « ordinaires » (forages d'irrigation essentiellement) réalisés par des entrepreneurs locaux ne laissant le plus souvent après leur intervention aucun document et essentiellement pour une mise en conformité d'un ouvrage.

2. Justification d'une réhabilitation

La question de réhabilitation d'un ouvrage se pose dans deux circonstances :

- si l'ouvrage ne répond pas à certaines règles, qu'elles soient administratives ou techniques ;
- si l'ouvrage est endommagé.

2.1. OUVRAGE NON CONFORME

Un ouvrage de captage d'eau peut ne pas être conforme soit vis-à-vis d'une réglementation, soit tout simplement d'un point de vue technique, lorsqu'il est mal conçu ou mal réalisé.

2.1.1. Ouvrage non conforme à la réglementation

• Législation

Il n'existe pas de loi réglementant la réalisation d'un forage. « N'importe qui » peut faire « n'importe quoi ». On a vu, par exemple, des agriculteurs qui ont soit acheté une foreuse, soit fabriqué de simples machines pour forer en utilisant la méthode du battage. On peut ainsi arriver à des conceptions les plus aberrantes : colonnes crépinées jusqu'à la surface du sol, forage ne captant l'eau que par la base du forage, etc.

• Prescriptions locales

Dans quelques départements de la région Centre (Loiret, Loir-et-Cher), des groupes de travail ayant pour but de réglementer la réalisation des forages ont été constitués pour la préservation des ressources en eau souterraines, dans le cadre de la loi sur l'Eau. Ils ont conduit à la rédaction de prescriptions transmises dans les dossiers de déclaration/autorisation de prélèvement d'eau souterraine. Mais, en l'absence de législation, ces règles ne sont que des recommandations et ne peuvent avoir un caractère d'obligation.

• SDAGE

La loi sur l'Eau prescrit l'élaboration de Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux, par bassin (SDAGE). Un des aspects de ces SDAGE concerne la réalisation des forages :

- « ils ne doivent pas permettre l'infiltration d'eaux de surface vers la nappe souterraine ;
- ils ne doivent pas capter 2 nappes différentes sur le plan hydraulique ou qualité de l'eau ».

- **Autres réglementations**

Dans les périmètres de protection rapprochée, un hydrogéologue agréé peut prescrire des conditions particulières de captage qui amènent à une réhabilitation ; par exemple :

- forage ne dépassant pas une profondeur donnée ;
- isolation de certains niveaux aquifères, ...

D'autres règles peuvent être émises : décrets préfectoraux, ...

2.1.2. Ouvrage non conforme aux règles de l'Art

Un ouvrage mal conçu ou mal exécuté conduit souvent à ne pas atteindre les objectifs du maître d'ouvrage (débit, qualité de l'eau) ; mais, il peut rendre aussi l'ouvrage non conforme à la réglementation. Plusieurs documents et organisations permettent de guider ou contrôler les foreurs pour la bonne réalisation d'ouvrages de captage ; les forages non conformes à ces règles techniques sont susceptibles d'être touchés par une obligation de réhabilitation. Ce sont :

- **C.C.T.G.**

Le Cahier des Clauses Techniques Générales (n° 76) présente toutes les règles générales à suivre pour la bonne exécution d'un ouvrage. Mais ce rapport concerne les règles générales (comme son nom l'indique) pour des forages les plus complets, donc lourds, et est difficilement applicable aux « petits » forages habituellement réalisés pour l'agriculture ou pour des particuliers (arrosage de jardins, ...).

- **Charte des foreurs d'eau**

Élaborée par le ministère de l'Environnement et par le Syndicat des foreurs, cette charte permet à des entreprises d'obtenir un label « qualité » qui est un gage, pour un maître d'ouvrage, de la bonne exécution du forage.

2.2. OUVRAGE ENDOMMAGÉ

La deuxième justification d'une réhabilitation est la plus classique : un forage se dégrade dans le temps, à une vitesse plus ou moins grande selon la qualité de l'eau captée ou de celle circulant derrière les tubes (entre les tubes et le terrain), et selon la manière dont est exploité l'ouvrage.

Les causes ne seront pas abordées ici, mais nous passerons en revue les différentes parties d'un ouvrage concernées par une réhabilitation. Trois parties d'un ouvrage peuvent être endommagées, auxquelles correspondent trois catégories de réhabilitation.

2.2.1. Tête de captage

C'est la partie apparente de l'ouvrage et tout l'aménagement proche de la surface : margelle d'un puits, tube d'un forage dépassant au-dessus du sol, cave abritant l'orifice du forage.

Une réhabilitation peut aussi concerner la mise en conformité de l'ouvrage pour éviter l'infiltration d'eau de surface dans le forage ou dans le puits.

2.2.2. Tube et cimentation

C'est la partie située au-dessus du réservoir capté ; elle comprend les tubes pleins et la cimentation entre ces tubes et le terrain.

Les endommagements correspondent :

- à une corrosion du tube conduisant à une perforation de celui-ci, ou à des incrustations ;
- à une rupture de joint de tube ;
- à une désagrégation du ciment derrière le tube.

Les conséquences sont alors :

- l'ensablement ou l'envasement de l'ouvrage ;
- l'introduction d'eau d'un aquifère supérieur éventuellement pollué qui se mélange à celle captée ;
- la circulation d'eau derrière le tube aboutissant à un mélange de nappes différentes.

2.2.3. Partie captante

Elle comprend les crépines ou tubes lanternés, le massif filtrant, le sabot de fond.

Les endommagements correspondent :

- à une obstruction des ouvertures des crépines ;
- à des perforations par corrosion ;
- à un écrasement des crépines ;
- à un colmatage du massif filtrant.

Les conséquences sont :

- la diminution de la productivité de l'ouvrage ;
- l'entraînement de fines dans l'eau captée et l'endommagement des pompes et du circuit en surface ;
- le comblement de la colonne de captage.

Les traitements et développements ayant pour but d'augmenter ou retrouver la productivité d'un ouvrage constituent l'objectif essentiel de la littérature (livres, rapports méthodologiques). Ce sujet ne sera donc pas repris ici.

De même, nous n'aborderons pas les travaux qui seraient destinés à améliorer la productivité d'un captage -si celui-ci se révélait incomplet ou mal conçu- par approfondissement du forage.

3. Démarches

La conduite de réhabilitation doit suivre logiquement la démarche suivante.

3.1. CONSTAT, SYMPTÔMES

C'est le point de départ. Il s'agit :

- soit de symptômes d'endommagement de l'ouvrage : baisse de la productivité, modification de la qualité de l'eau, présence de sable dans le réseau de surface, ...
- soit d'un constat de non conformité avec une réglementation :
 - . infiltration d'eau de surface, décelable par simple visite du site,
 - . mélange de deux nappes distinctes, d'après la coupe technique connue.

Rappelons que c'est ce constat de non-conformité qui est considéré dans ce rapport.

3.2. DIAGNOSTIC

Avant d'entreprendre toute intervention sur l'ouvrage, il est indispensable non seulement de connaître la cause de l'endommagement -si tel est le cas-, mais également d'acquérir toutes les informations relatives au captage : coupe technique très précise, coupe géologique.

Si tel n'est pas le cas, un bureau d'étude sera amené à faire une étude géologique pour reconstituer la coupe et réaliser, le cas échéant, certaines opérations de diagnostic sur le forage : diagraphies, caméra-vidéo, pompage, micro-moulinet, ...

La documentation se rapportant aux diagnostics est très abondante, même dans celle qui se déclare traiter de la réhabilitation ; nous ne développerons donc pas ce sujet ici.

Le diagnostic conduit à proposer un programme de réhabilitation dont le coût doit être chiffré pour une analyse économique. Le coût de la réhabilitation -avec la connaissance du risque d'échec- est à comparer au coût d'un nouvel ouvrage, sans omettre le coût du comblement de l'ouvrage à abandonner.

3.3. RÉHABILITATION

Une fois le programme accepté, les travaux de réhabilitation peuvent être entrepris. Les principaux travaux que l'on peut rencontrer habituellement en région Centre sont présentés dans la suite du rapport (ch. 6 à 9).

3.4. CONTRÔLES

La bonne exécution et l'efficacité d'une réhabilitation doivent être contrôlées. Ces opérations de contrôle sont souvent les mêmes que celles du diagnostic, car il faut comparer ce qui est comparable ; elles permettent ainsi d'évaluer l'efficacité du remède par comparaison des résultats : test par pompage par paliers de débit, analyse chimique de l'eau, caméra-vidéo, diagraphie, ...

4. Critères de réhabilitation

Les travaux de réhabilitation dépendent essentiellement de 2 critères :

- le contexte hydrogéologique (disposition des nappes aquifères) ;
- la nature du captage (puits, forage,...).

4.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

En région Centre, la réhabilitation d'ouvrages est envisagée pour des captages de nappes dans les terrains sédimentaires où les couches géologiques du Secondaire au Quaternaire sont disposées en couches superposées. On ne considèrera pas les aquifères en domaine de « socle » (granite, roches métamorphiques, ...).

Dans ces conditions, les travaux de réhabilitation d'un ouvrage dépendent de la configuration de la (ou des) nappe(s) captée(s). Nous retiendrons trois cas reportés sur la figure 1.

4.1.1. Nappe libre

Les caractéristiques sont :

- l'aquifère affleure et n'est pas recouvert par un écran protecteur ;
- les transferts verticaux d'eau de surface vers la nappe se font directement sur toute l'étendue de l'aquifère.

Dans ce cas, une réhabilitation consisterait en un aménagement de la tête de puits pour éviter un engouffrement direct des eaux de surface vers la nappe ; mais dans ce cas, il n'y a habituellement pas de problème de protection de la qualité de l'eau et une mise en conformité ne s'avère pas indispensable.

4.1.2. Nappe unique captive

Les caractéristiques sont :

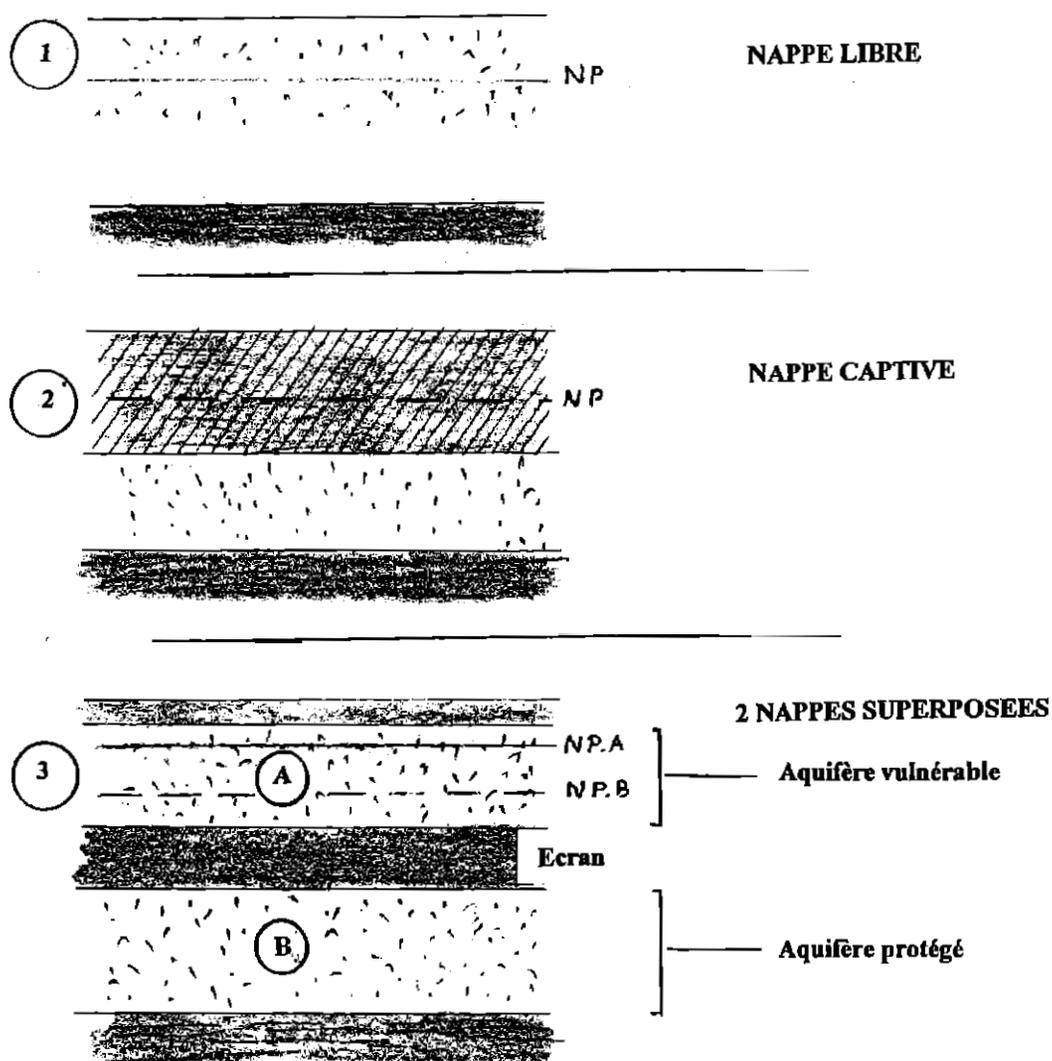
- l'aquifère est recouvert par un écran imperméable protecteur ;
- la nappe aquifère peut être de bonne qualité ;
- les transferts verticaux d'eau de la surface vers la nappe ne seraient dus, pour un forage, que par écoulement derrière le tube de soutènement.

Une réhabilitation consisterait à rétablir l'étanchéité initiale derrière le tube, pour éviter toute infiltration depuis la surface du sol qui contaminerait la nappe naturellement protégée. Ici, une réhabilitation peut être imposée pour la protection de la ressource.

4.1.3. Deux nappes superposées

Les conditions sont les suivantes :

- deux formations aquifères A et B sont séparées par un écran imperméable (argile par exemple) ;
- les 2 nappes ne sont pas en équilibre hydrostatique : dans le cas présent, le niveau piézométrique de la nappe A est plus élevé que celui de la nappe B ;
- la nappe A non -ou mal- protégée est susceptible d'être polluée ;
- l'eau de la nappe B est de bonne qualité et doit être protégée.



N.P. : Niveau piézométrique

Fig. 1 – Contexte hydrogéologique des nappes aquifères

Ces conditions sont relativement fréquentes en région Centre. Elles se rencontrent pour les aquifères suivants :

- Calcaires de Pithiviers/Calcaire d'Etampes, sous la forêt d'Orléans, séparés par la Molasse du Gâtinais ;
- Calcaire de Brie/Calcaire de Champigny, séparés par les Argiles vertes ;
- Calcaire de Beauce/Craie, séparés par l'Argile à silex ;
- Calcaire de Touraine/Craie, en Indre-et-Loire, séparés par la marne de la partie inférieure du Calcaire de Touraine.

Ce schéma est aussi généralisable à tous les aquifères superposés dans les conditions d'exploitation, lorsque la dépression engendrée dans la nappe inférieure par le pompage peut provoquer un appel d'eau de la nappe supérieure.

Une réhabilitation concerne uniquement les forages. Elle consiste principalement à :

- **occulter l'aquifère inférieur pour ne capter que la nappe supérieure ;**
- **occulter l'aquifère supérieur pour ne capter que la nappe inférieure.**

4.2. NATURE DE L'OUVRAGE

On différencie trois types de captages d'eau :

- . les sources captées,
- . les puits,
- . les forages.

Pour répondre aux besoins rencontrés en région Centre, nous traiterons des puits et des forages.

4.2.1. Puits

Les principales caractéristiques des puits traditionnels sont les suivantes :

- les puits ne concernent que la première nappe rencontrée (la nappe phréatique) ; ils correspondent aux deux premiers cas du contexte hydrogéologique, à savoir les nappes libres et les nappes uniques captives ;
- ils sont creusés jusqu'au niveau de l'eau et n'atteignent pas nécessairement le substratum de la nappe (les puisatiers ne sont pas des scaphandriers). De ce fait, ils s'assèchent plus fréquemment en période de sécheresse ;
- de par leur conception, leurs parois (pierres, briques) ne sont pas étanches et ils absorbent les eaux superficielles les plus polluées depuis la surface du sol ;
- très anciens, presque toujours, la coupe géologique est inconnue.

Les puits sont souvent utilisés pour absorber des eaux de rejet : eaux de toiture, drainage de sous-sol, exutoire d'épandage en terrain peu perméable, ... Les puits sont donc les principaux vecteurs de pollution vers les nappes d'eau souterraine.

Pour un puits, une réhabilitation concernera la protection de la partie supérieure pour éviter toute introduction d'eau de ruissellement directement dans l'ouvrage.

Une réhabilitation peut concerner aussi l'approfondissement du puits, s'il s'agit de s'assurer d'une productivité suffisante en toute saison ; mais rappelons que ce cas ne sera pas traité ici.

4.2.2. Forages

Les forages concernent les trois types de contexte hydrogéologiques mentionnés : nappe libre, nappe unique captive et nappes superposées.

Les principales caractéristiques qui interviennent ici sont les suivantes :

En ce qui concerne la colonne dans les morts-terrains, au-dessus de l'aquifère à capter :

- L'espace annulaire entre le tube et le terrain est un axe privilégié de circulation d'eau venant de la surface et allant vers la nappe. Cet espace doit donc être obturé.
- La cimentation derrière le tube doit restituer l'étanchéité initiale du terrain face aux couches imperméables qui recouvrent un aquifère ou qui séparent deux aquifères. Elle est indispensable dans le cas d'une nappe captive à protéger et pour isoler deux nappes qui ne sont pas en équilibre hydrostatique ou dont l'eau est de caractéristiques différentes (cf. fig. 4.1).
- Pour qu'une cimentation joue son rôle, elle doit être régulièrement répartie autour du tube de soutènement ; pour cela, ces tubes doivent être équipés de centreurs.
- Pour être efficace, le ciment doit bien adhérer au terrain et au tube ; il doit donc être injecté par la base (il existe plusieurs méthodes) et, autant que possible, sous pression.

En ce qui concerne la partie captante :

- les crépines (ou tubes lanternés) doivent être placées face à la formation aquifère, et non face aux terrains argileux ;
- l'ouverture des crépines doit être adaptée à la lithologie de la roche réservoir et en particulier à la granulométrie des sables ;
- l'équipement ne doit pas mettre en communication deux nappes de caractéristiques différentes (pression hydrostatique, qualité de l'eau) ;
- la colonne de captage doit être fermée à sa base.

5. Types de réhabilitation

Nous discernerons deux types d'intervention pour réhabiliter un ouvrage.

5.1. TRAITEMENTS

Leur objectif est d'améliorer la productivité d'un ouvrage en le régénérant. Les principales méthodes sont :

- par injection de produit chimique dans le forage, destiné soit à détruire les encroûtements sur les tubes ou les crépines, soit à inhiber des réactions pouvant conduire à une corrosion ou à une incrustation ;
- par méthode physique : brossage, grattage des tubes ;
- par pompage selon diverses méthodes (soupape, émulsion d'air, pistonnage, ...) pour retrouver une productivité perdue.

Ce type de réhabilitation ne sera pas traité ici. On se rapportera à la documentation abondante à ce sujet (cf. bibliographie).

5.2. TRANSFORMATIONS

Il s'agit :

- de remplacer ou doubler un équipement en place (rechemisage d'un tube, ...), en cas de détérioration de l'ouvrage ;
- d'approfondir l'ouvrage pour améliorer la productivité dans le cas d'un ouvrage insuffisamment profond, comme ce fut le cas en Beauce lors d'épisodes de forte sécheresse (1976, 1988-1994) ;
- de modifier l'objectif d'un forage spécifique en condamnant la partie captante par comblement et aménager une nouvelle partie captante dans le tube de soutènement. Ce type de transformation concerne essentiellement les forages pétroliers abandonnés repris pour capter une nappe d'eau moins profonde. Ce cas n'est pas connu en région Centre ;
- de modifier la conception de l'ouvrage pour répondre à la demande de mise en conformité de l'ouvrage. C'est ce type de réhabilitation qui sera traité ici.

Un tableau synthétique est présenté en annexe 2.

6. Réhabilitation en nappe libre

6.1. PUIITS

L'objectif est la protection de la tête de puits pour éviter que le ruissellement de surface pénètre dans le puits. Il n'est pas nécessaire de rendre la paroi en zone non saturée imperméable ; en effet, dans ce cas de nappe libre, les transferts verticaux existent déjà naturellement.

Description des travaux (fig. 2) :

- Excavation autour de la paroi jusqu'à la roche saine, compacte ou imperméable si possible.
- Construction d'une margelle (si elle n'existe pas) étanche (béton, buse cimentée sur la paroi) de quelques décimètres de hauteur, ou jusqu'au-dessus du niveau des plus hautes eaux en zone inondable.
- Coulage de ciment pour assurer une bonne adhérence entre le terrain et la paroi du puits.
- Le haut de ce coulage forme un socle pour éviter toute stagnation d'eau contre la paroi.

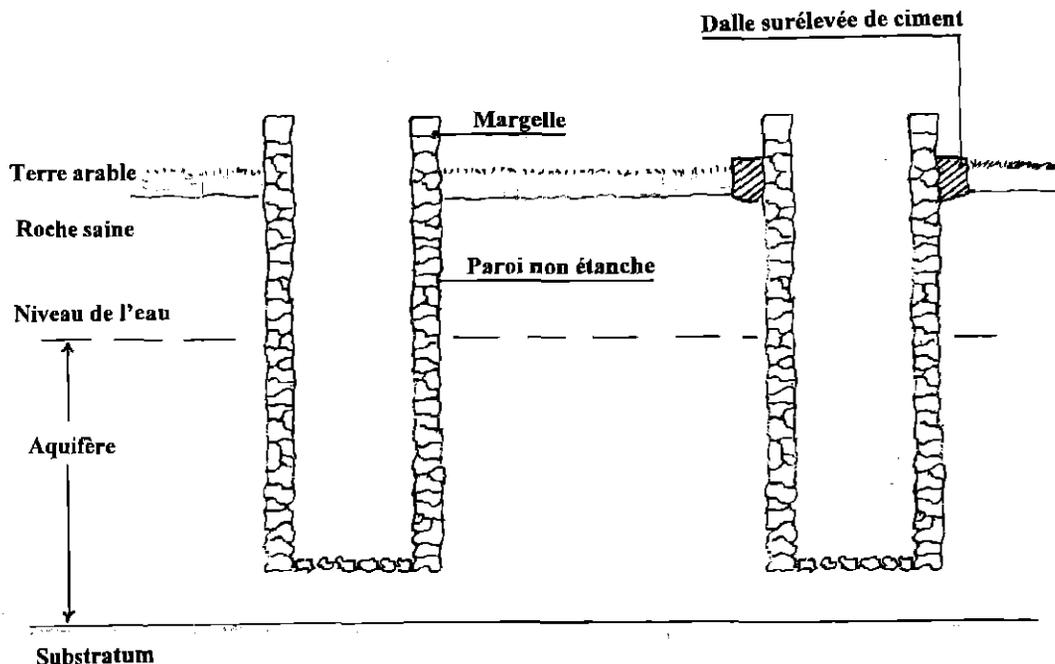


Fig. 2 - Réhabilitation en nappe libre : puits.

6.2. FORAGE

Pour un forage captant une nappe libre non protégée, une réhabilitation consiste en une mise en conformité de la tête de puits pour éviter une infiltration directe des eaux de surface dans l'ouvrage.

Description des travaux (fig. 3) :

- Excavation autour du tube jusqu'à la roche saine, compacte, ou imperméable si possible.
- Pose d'un tube dépassant de 30 à 50 cm au-dessus du sol -si nécessaire- ou jusqu'au dessus du niveau des plus hautes eaux en zone inondable, de 2 façons :
 - . soit par prolongation du sommet du tube en place par tube soudé,
 - . soit par pose d'un tube de plus grand diamètre, coiffant le tube en place.
- Coulage de ciment pour assurer une bonne adhérence entre le terrain et la paroi.
- Le haut de ce coulage forme un socle dont la pente est tournée vers l'extérieur, pour éviter toute stagnation d'eau contre le tube.

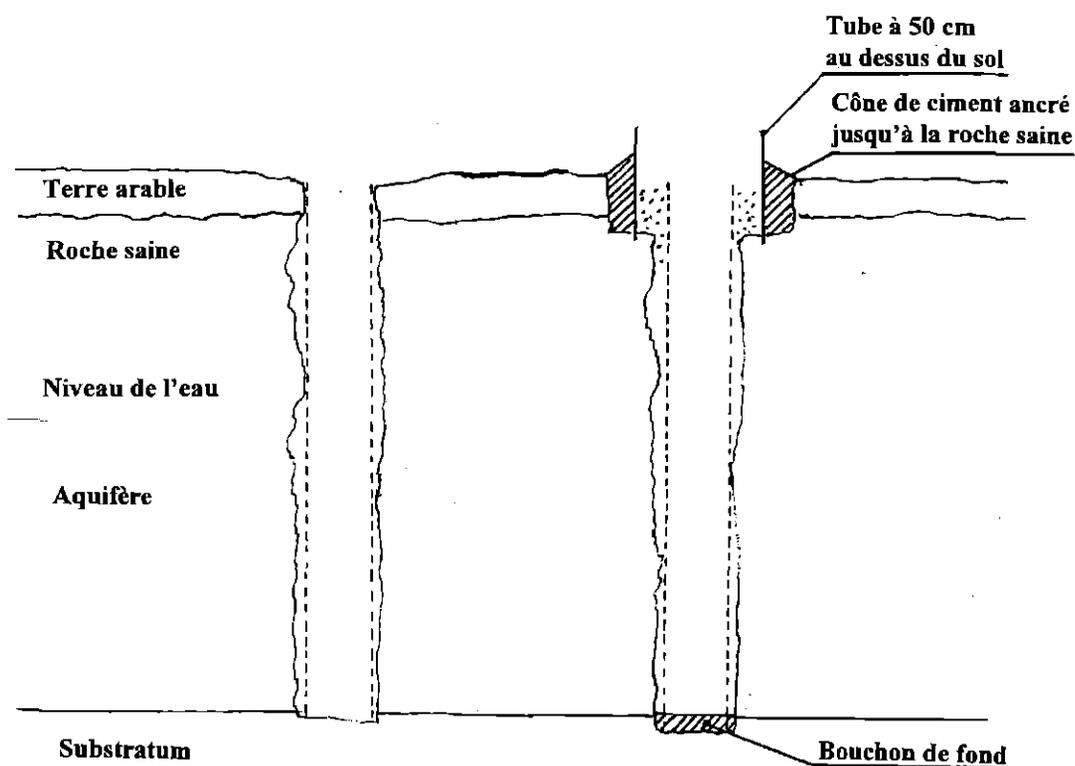


Fig. 3 - Réhabilitation en nappe libre : forage.

Un autre cas de réhabilitation se rencontre lorsque les crépines ne sont pas fermées à la base. Dans certaines conditions géologiques, il y a risque d'entrée de sable, de remblaiement du fond du forage et d'endommagement des pompes. Il est possible de fermer les crépines en coulant un bouchon de ciment, de préférence injecté à la base par une canne.

La viscosité du ciment sera ajustée en fonction de la perméabilité du terrain au niveau du bouchon et des risques de perte dans le réservoir si le forage n'atteint pas le substratum de l'aquifère.

6.3. FORAGE DANS UN PUIITS

Un cas particulier se rencontre fréquemment lorsqu'un puits est prolongé en forage dans une nappe profonde. L'objectif est de se protéger des infiltrations d'eaux superficielles polluées, au-dessus de la nappe captée, dans le cas où cette nappe serait utilisée pour l'alimentation en eau potable. Ce cas se rencontre par exemple en Beauce.

Description des travaux (fig. 4) :

La solution consiste à équiper l'intérieur du puits comme un forage :

- Arasement de la margelle du puits et de la partie supérieure de la paroi jusqu'à la roche saine.
- Mise en place d'une chèvre ou d'une machine de forage en aménageant une plateforme.
- Descente d'un tube plein d'un diamètre plus grand que celui de la colonne crépinée, coiffant celle-ci et bien ancré au fond du puits.
- Pose d'un bouchon de ciment autour du tube plein, au fond du puits. Ce bouchon sera mis en place par le bas, à l'aide de canne d'injection.
- Remblaiement autour du tube par un matériau imperméable, stable, jusque vers 1 m de profondeur, face à la roche saine et compacte.
- Coulage d'un socle de ciment jusqu'au-dessus du sol et d'un diamètre plus grand que celui du puits, afin d'éviter que des eaux de surface soient en contact avec le tube et la partie remaniée.

REHABILITATION EN NAPPE LIBRE

FORAGE DANS UN PUITTS

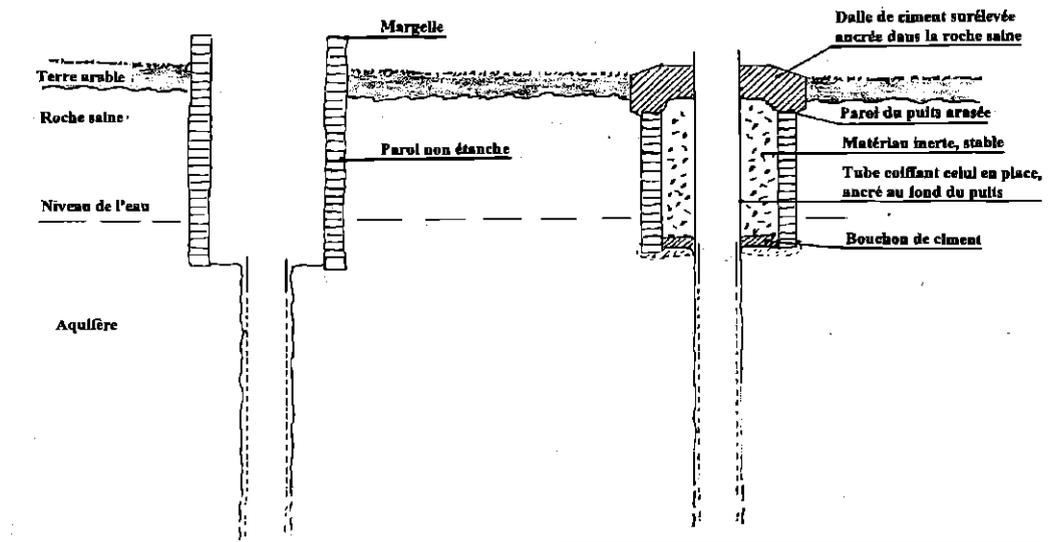


Fig. 4 - Réhabilitation en nappe libre : forage dans un puits.

7. Réhabilitation en nappe unique captive

Pour un ouvrage captant une nappe libre protégée, une réhabilitation consiste en une mise en conformité de la tête de puits pour éviter une infiltration des eaux de surface vers la nappe. Le cas est similaire à celui précédent, mais il peut y avoir une obligation de résultat -en ce qui concerne la qualité de l'eau souterraine- qui implique un très grand soin dans l'exécution de l'opération et un contrôle final. On cherchera, dans la mesure du possible, à restituer l'imperméabilité originelle de la couverture sur toute sa hauteur.

7.1. PUIITS

Description des travaux (fig. 5) :

si l'on veut restituer l'imperméabilité des morts-terrains sur toute leur hauteur, la solution la mieux adaptée consiste à équiper l'intérieur du puits comme un forage :

- Arasement de la margelle du puits et de la partie supérieure de la paroi jusqu'à la roche saine.
- Curage du fond du puits si nécessaire.
- Mise en place d'une chèvre ou d'une machine de forage en aménageant une plateforme.
- Descente d'une colonne de production (crépines face à l'aquifère, tube plein au dessus) fermée à la base.
- Mise en place d'un massif de gravier jusqu'au toit de l'aquifère.
- pose d'un bouchon d'argile formant un joint étanche au-dessus du gravier.
- Remblaiement autour du tube par un matériau imperméable jusque vers 1 m de profondeur, dans la roche saine et compacte.
- Coulage d'un socle de ciment jusqu'au dessus du sol, dans les mêmes conditions que précédemment.

Si le volume annulaire face aux morts-terrains n'est pas trop important, la cimentation au-dessus du joint étanche pourra être effectuée jusqu'à former le socle, en une seule passe.

Cette réhabilitation est onéreuse et ne se justifie que pour les puits très profonds où l'on ferait, par rapport à un nouveau forage, l'économie du creusement (dit aussi « foration »)

En outre, plusieurs entreprises de forages refusent de travailler au-dessus d'un puits existant, conseillant alors la réalisation d'un forage à côté du puits.

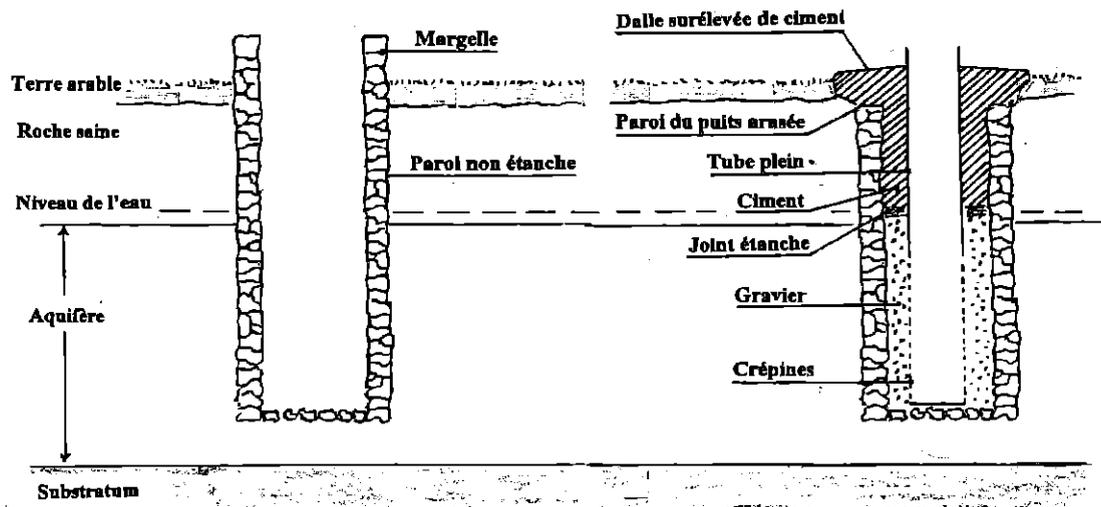


Fig. 5 - Réhabilitation en nappe unique captive : puits.

7.2. FORAGE

En l'absence de contraintes d'environnement fortes, la réhabilitation du forage ne se différencie pas de celle exposée précédemment (cf. chap. 6.2, fig. 3).

Par contre, si l'on se trouve dans un environnement très sensible, on devra tenter d'arracher la colonne en place, après mise en boue du forage pour tenir les terrains.

Deux cas se présentent :

- en cas de succès, on se place dans les conditions d'un nouveau forage après la phase de creusement ;
- en cas d'échec, on se trouve dans l'obligation de condamner l'ouvrage en le comblant (cf. chap. 9.2.2, fig. 13).

8. Réhabilitation en nappes superposées

La réhabilitation d'un captage « mixte » c'est-à-dire captant deux nappes distinctes hydrauliquement et/ou du point de vue qualité de l'eau- est le point crucial de la remise aux normes, selon les préconisations des SDAGE, des ouvrages de captage. Ce sujet ne peut concerner que les forages.

En région Centre, ces conditions hydrogéologiques sont assez fréquentes, surtout dans le cas particulier où la pression hydrostatique de la nappe inférieure est plus faible que celle de la nappe supérieure ; dans ce cas, hors période de pompage, la nappe supérieure qui est la plus vulnérable et est susceptible d'être contaminée par les activités de surface, se déverse naturellement dans la nappe inférieure qui peut constituer une ressource de bonne qualité.

Rappelons que ces conditions sont rencontrées pour les aquifères suivants :

- Calcaire de Pithiviers/Calcaire d'Etampes, sous la forêt d'Orléans.
- Calcaire de Brie/Calcaire de Champigny, au nord de Pithiviers.
- Calcaire de Beauce/Craie du Sénonien, sur le pourtour de la Beauce.
- Calcaire de Touraine ou Faluns de Touraine/Craie, en Indre-et-Loire.

Le principe de ces conditions est porté en figure 6.

La réhabilitation consiste, en ces cas, à occulter un des deux aquifères pour supprimer tout risque d'échange entre les deux.

Dans tous les cas, l'opération serait aisée si l'on pouvait arracher la colonne en place ; mais ces forages étant habituellement profonds, l'arrachage se révèle le plus souvent impossible et l'on raisonnera seulement sur un forage équipé qu'il faut transformer.

8.1. CAPTAGE DE LA NAPPE SUPÉRIEURE (fig. 7)

Cette opération repose sur 2 conditions préalables :

- connaissance précise des cotes de l'écran imperméable séparant les deux aquifères ;
- assurance que l'aquifère supérieur offrira un potentiel suffisant pour l'exploitant (transmissivité, hauteur d'eau pour l'installation d'une pompe).

Une véritable étude hydrogéologique est donc nécessaire au préalable.

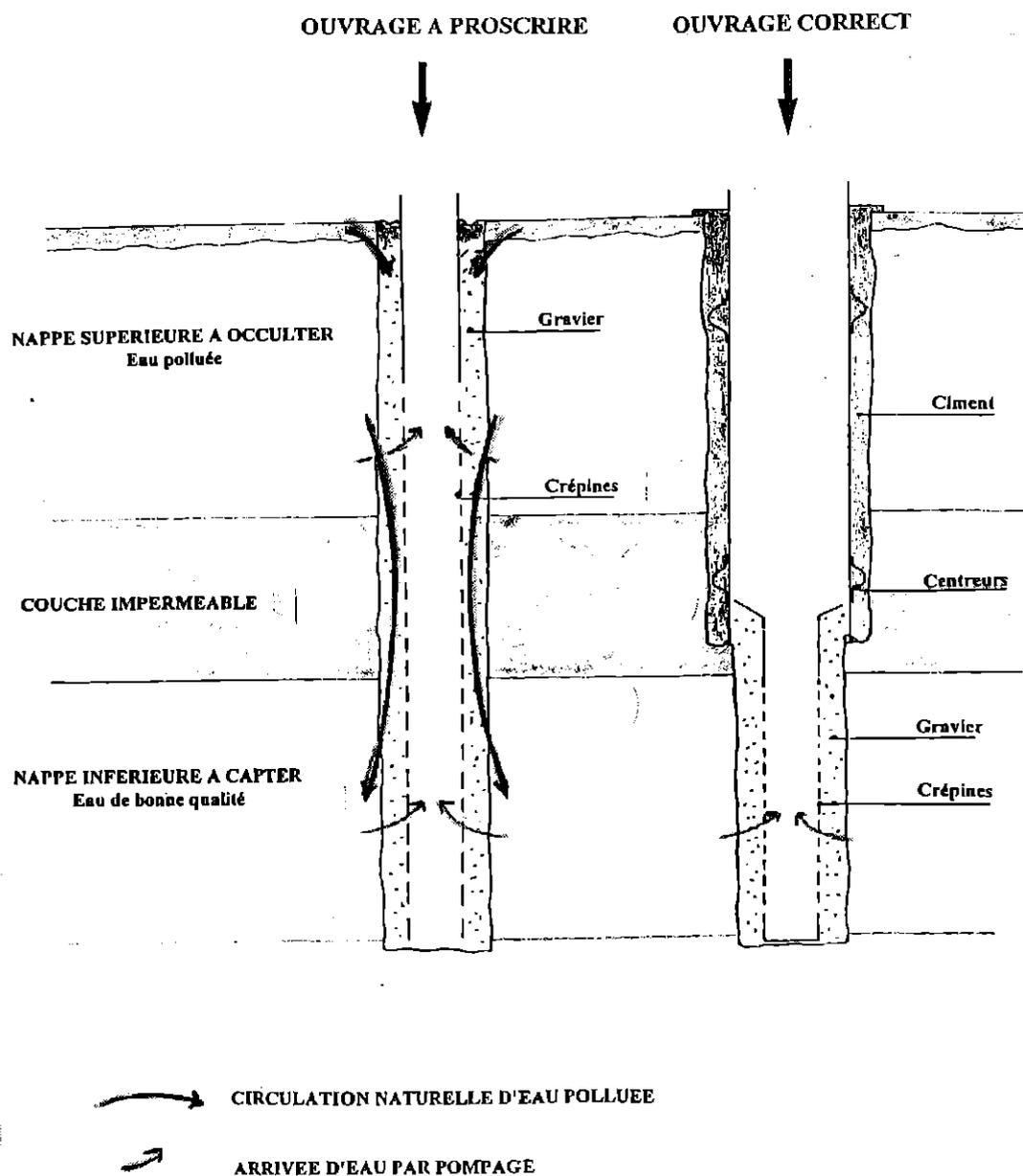


Fig. 6 - Conception d'un forage captant la nappe inférieure.

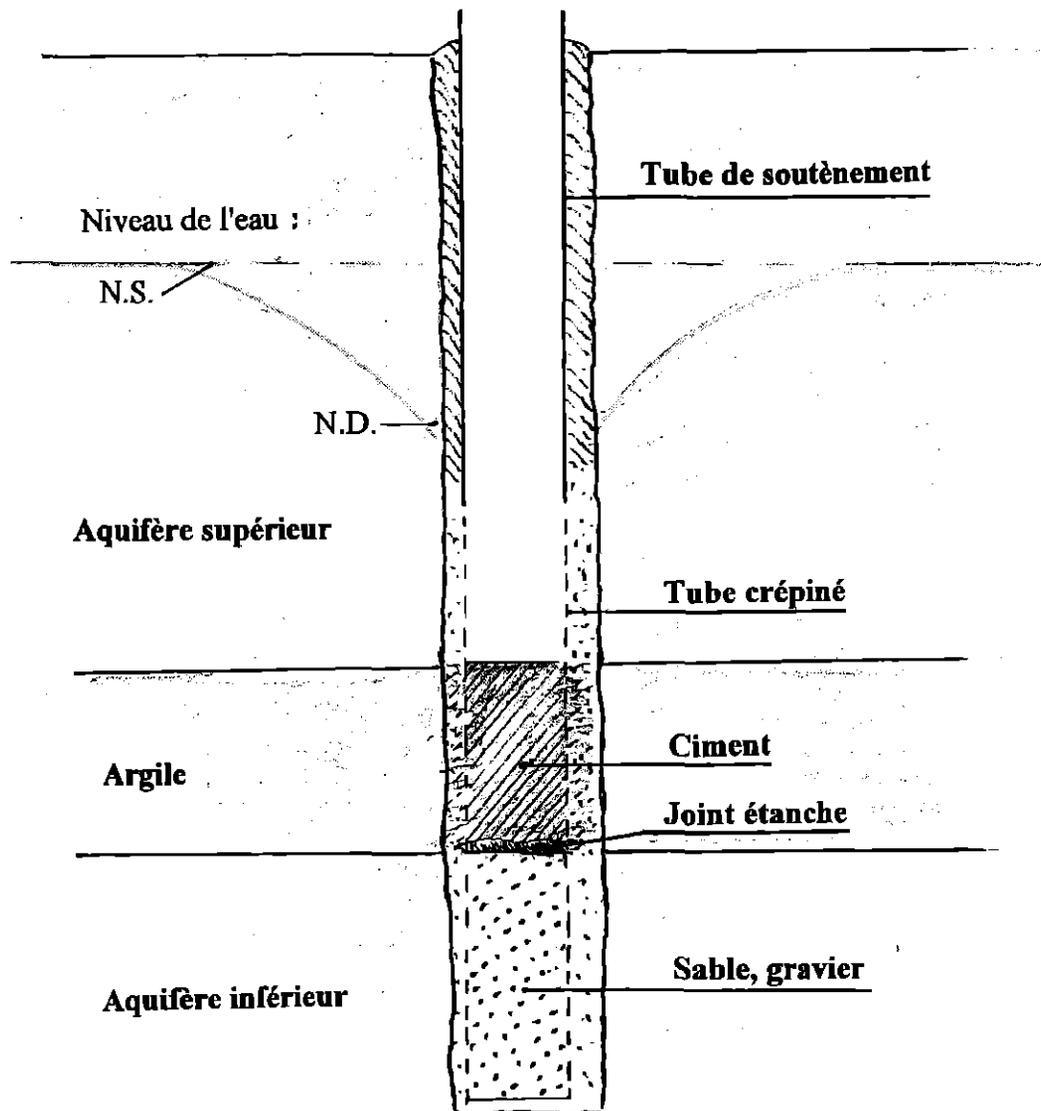


Fig. 7 - Captage de la nappe supérieure.

Description des travaux :

- Comblement de la partie inférieure, jusqu'au toit de l'aquifère inférieur, par des cailloux, gravier, sable (suivant la perméabilité du milieu) siliceux, inerte et stable.
- Percement des crépines à la base de l'écran argileux (par charges creuses, abrasion par jet, ...), si l'on veut obtenir une isolation parfaite.
- Mise en place d'un joint étanche (type « Sobranite », boulettes d'argile gonflante) pour protéger le gravier sous-jacent de l'opération suivante.
- Injection d'un bouchon par un laitier de ciment, par le bas, sur toute la hauteur de l'écran argileux.

Si la crépine n'a pas été perforée au préalable, une partie de ce ciment s'infiltrera dans le gravier sous-jacent et dans le réservoir inférieur ; cette perte sera réduite en jouant sur la viscosité du ciment. D'un autre côté, le ciment s'infiltrera imparfaitement dans le massif filtrant derrière la crépine et n'adhérera qu'imparfaitement au terrain ; l'isolation ne sera pas parfaite, ce qui peut cependant être acceptable dans certains cas.

A la fin de cette opération, après le temps de prise, il convient de sonder le « top » du ciment et compléter au besoin la cimentation jusqu'au toit de l'écran argileux.

8.2. CAPTAGE DE LA NAPPE INFÉRIEURE (fig. 8)

L'opération consiste à occulter l'aquifère supérieur, dans un forage équipé.

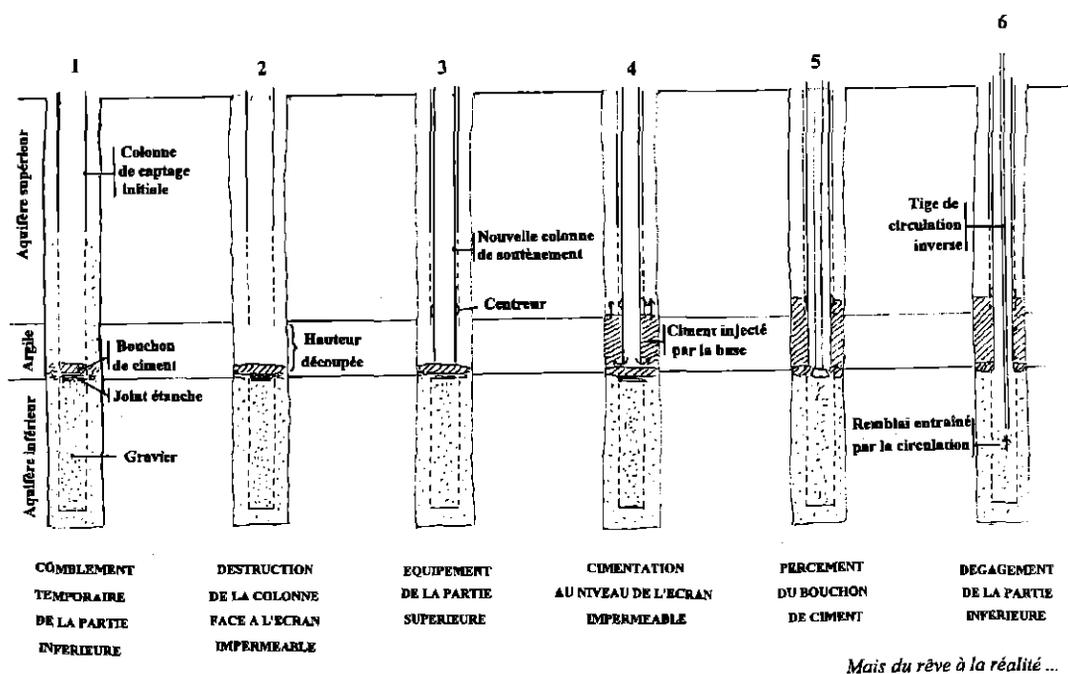


Fig. 8 - Captage de la nappe inférieure.

Le principe des travaux est le suivant :

- Complément temporaire de la partie inférieure par du sable ou gravier (schéma 1).
- Découpage de la colonne crépinée sur toute la hauteur de l'écran imperméable (schéma 2).
- Pose d'un joint étanche pour protéger le gravier qui vient d'être mis en place (schéma 1 et 2).
- Injection par canne d'un bouchon de ciment (schéma 1 et 2).
- Descente d'un nouveau tube de soutènement ancré sur le bouchon de ciment, avec centreur, au moins vers la base (schéma 3).

- Cimentation du tube de soutènement par injection par le bas, au minimum sur toute la hauteur de l'écran imperméable, mais, si possible, sur toute la hauteur du tube (schéma 4).
- Percement du bouchon de ciment à la base de la nouvelle colonne (schéma 5).
- Dégagement du sable ou gravier mis en place à la première phase par circulation inverse (schéma 6).

C'est donc une opération complexe, très lourde et très coûteuse qui n'a jamais été réalisée dans la région ; elle demeure un raisonnement intellectuel... Les conditions de réalisation sont extrêmement contraignantes :

- la colonne initiale (tube et crépines) au niveau de l'aquifère supérieur doit être de grand diamètre (> 500 mm) ;
- la découpe de la colonne exige un matériel spécifique que seules les grosses entreprises possèdent. L'opération est longue et coûteuse ;
- la cimentation doit être faite sous faible pression sous peine d'obstruer le réservoir inférieur ;
- l'injection de ciment face à l'écran argileux nécessite soit un diamètre initial de la colonne encore plus grand pour glisser une canne d'injection, soit l'emploi d'un sabot de cimentation qui est coûteux et qui exige une entreprise spécialisée.

Dans le contexte actuel de la région Centre, cette réhabilitation ne peut être envisagée et l'on devra réaliser un nouvel ouvrage conforme à la réglementation, tout en condamnant et comblant le forage non conforme (cf. chap. 10).

9. Aménagement de tête de forage

9.1. AMÉNAGEMENT HORS SOL (fig. 9)

Cet aménagement minimal répond essentiellement aux travaux faits couramment dans le domaine agricole. Il a été décrit précédemment à propos de la protection contre le ruissellement en surface, mais est repris ici pour attirer l'attention sur l'état d'un forage à la fin des travaux.

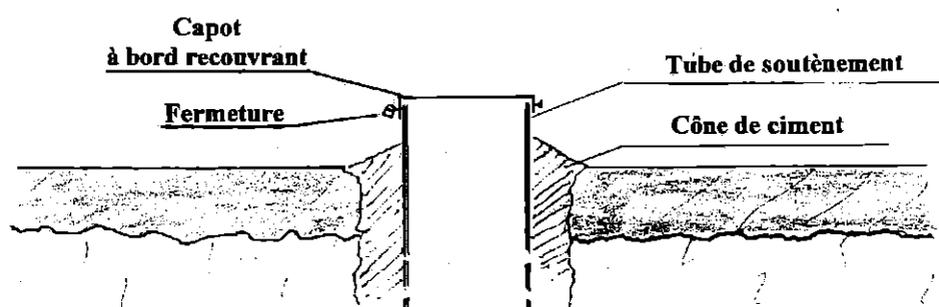


Fig. 9 - Aménagement minimal d'une tête de forage.

Descriptif :

- Le tube doit dépasser au-dessus du sol d'une hauteur telle que les eaux de surface ne puissent pénétrer dans le forage. Habituellement, cette hauteur est de 50 cm environ ; mais elle doit être adaptée aux conditions locales. En zone inondable, le tube est entouré d'un monticule dont la hauteur est supérieure aux plus hautes eaux. C'est ce que l'on observe couramment pour les captages d'eau potable dans les plaines alluviales.
- Un socle en ciment de forme conique entoure le tube, la pente étant tournée vers l'extérieur, pour éviter toute stagnation d'eau contre le tube. Cette dernière condition est importante pour les forages agricoles équipés de pompes à fort débit et à démarrage brutal ; le coup de bélier peut provoquer le décollement du tube, voire un déplacement vertical de celui-ci, d'où un risque d'infiltration entre le tube et le ciment.
- Un capot à bord recouvrant et cadénassé doit fermer le forage lorsque celui-ci est débarrassé de son équipement de pompage, ou si le tube d'exhaure part latéralement au-dessous du sommet du tube.

9.2. TÊTE DE PUIITS DANS UNE CAVE

Pour de nombreux forages, la tête de puits se situe dans une « cave », pour que le départ de la conduite de distribution et le compteur soient à l'abri du gel. Une tête de puits peut aussi être enterrée afin de ne pas encombrer la surface du sol.

Deux aménagements sont représentés en figure 10, suivant les conditions de drainage des eaux au fond de la cave : par écoulement gravitaire ou par pompe vide-cave.

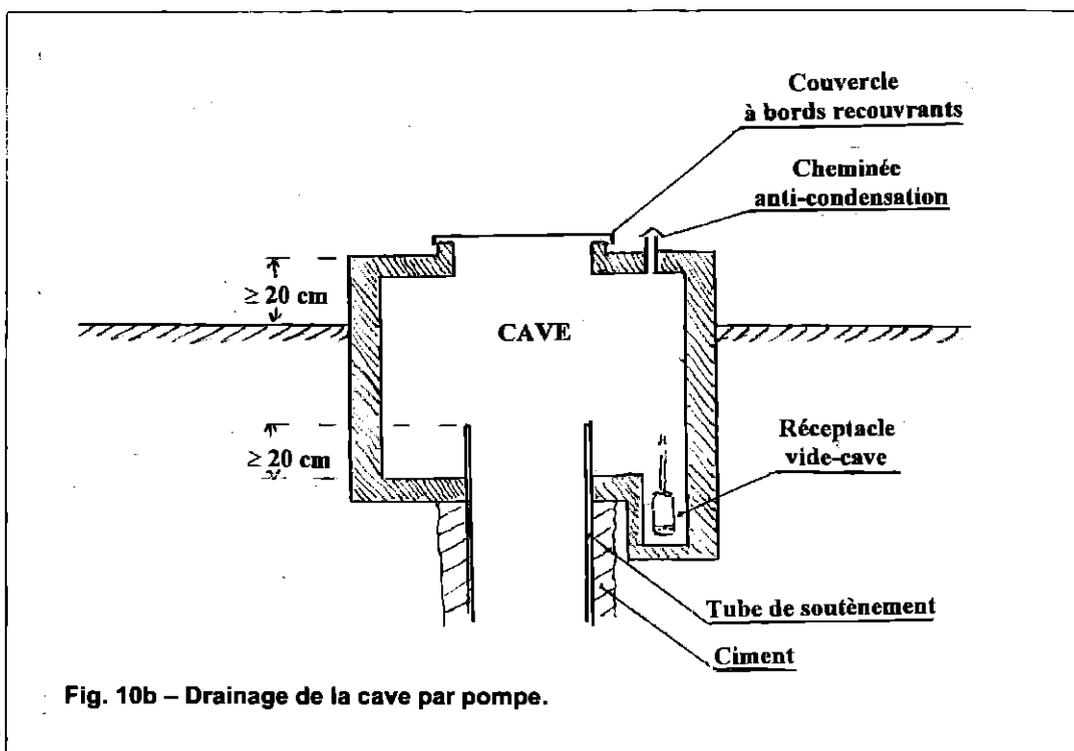
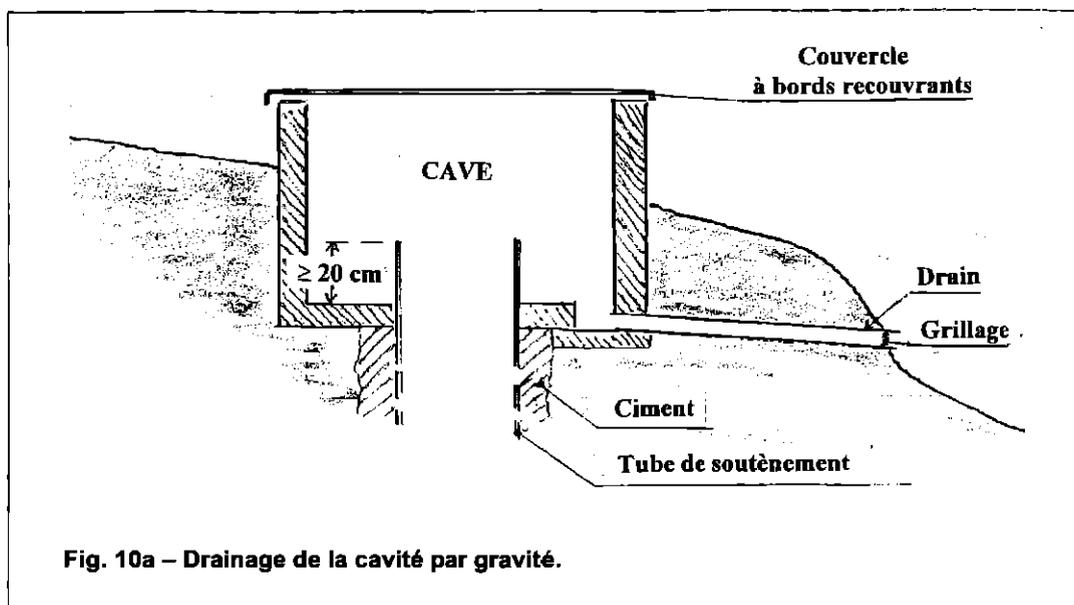


Fig. 10 - Aménagement d'une tête de puits dans une cave.

Descriptif :

- La cave (parois et fond) doit être absolument étanche.
- Le bord supérieur de la cave dépasse de quelques décimètres au-dessus du sol.
- La trappe d'accès est fermée par une plaque à bords recouvrants ; elle doit être fermée à clé (cadenas).
- Une cheminée anti-condensation doit être grillagée (ou être équipée d'un filtre) pour éviter toute intrusion d'animaux. Des grilles d'aération peuvent être placées au sommet des parois de la cave.
- Le tube du forage doit dépasser de plusieurs décimètres du fond de la cave, afin d'être protégé de toute intrusion d'eau due à des fuites éventuelles. On veillera à ce qu'il n'y ait pas d'échancrure dans le tube (pour passage du tube d'exhaure par exemple) rabaisant ce seuil de sécurité.
- Il n'y aura aucun retour d'eau dans le tube du forage (ce qui est parfois observé pour éviter les surpressions au démarrage ou pour obtenir un débit de production inférieur à celui de la pompe).
- La cave doit être drainée de l'eau qui peut recouvrir le fond, de 2 manières correspondant aux 2 schémas de la figure 10 :
 - . drain par écoulement gravitaire, si la topographie le permet. Dans ce cas, le drain doit être grillagé pour éviter toute intrusion d'animaux ;
 - . réceptacle avec pompe vide-cave à déclenchement automatique. Pour les captages de grande importance (AEP), la pompe est alimentée en secours par un groupe électrogène indépendant.

9.3. ÉQUIPEMENT D'EXHAURE

Il comprend :

- la suspension de la pompe ;
- les tubes d'exhaure entre la pompe et le réseau de surface ;
- les câbles électriques (alimentation, électrodes de sécurité).

La condition primordiale est que cet équipement n'annihile pas les mesures prises pour éviter l'infiltration d'eau superficielle dans le forage, à savoir la surélévation du tube au-dessus du sol ou du fond de la cave.

Cet aménagement est représenté en figure 11 pour les deux types d'ouvrages : les têtes de forage au niveau du sol ou dans une cave.

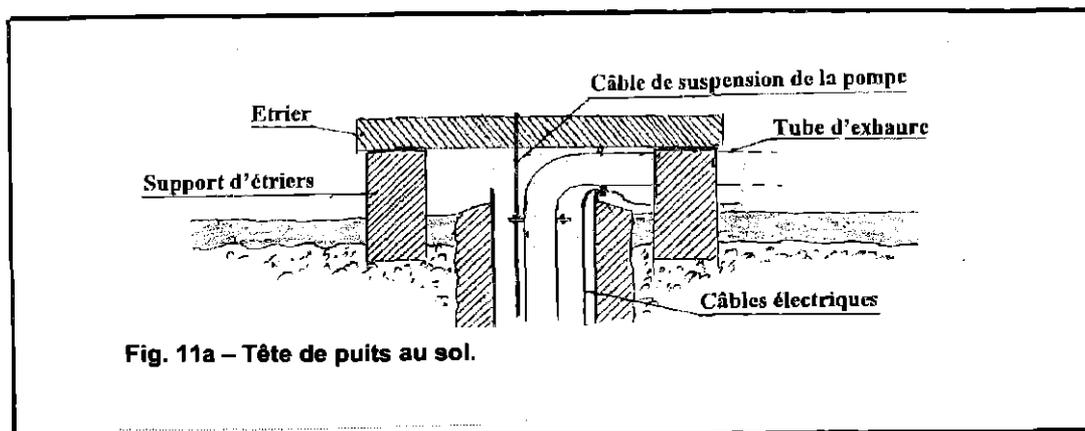


Fig. 11a – Tête de puits au sol.

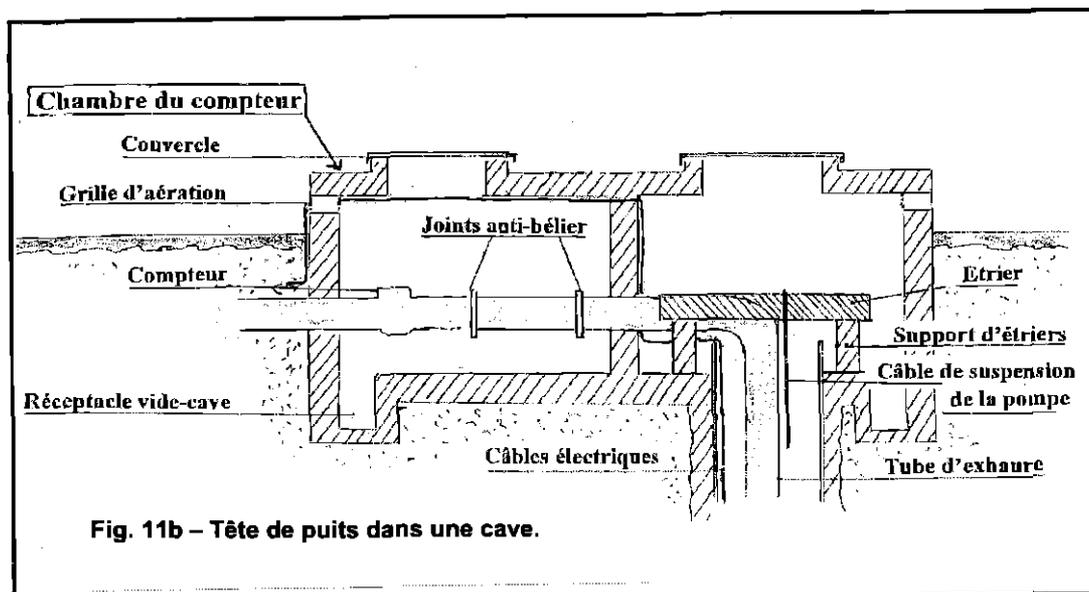


Fig. 11b – Tête de puits dans une cave.

Fig. 11 - Aménagement d'exhaure.

• Suspension de la pompe

Le plus souvent, les pompes sont suspendues par un câble attaché à des étriers posés au-dessus du tube. Les supports des étriers doivent répondre à deux conditions :

- les étriers ne peuvent pas être posés sur le tube même, pour des raisons de résistance du tube et pour éviter que les chocs à chaque démarrage de la pompe ne désolidarise le tube du ciment ;
- les étriers ne doivent pas être posés au sol en traversant le tube par des échancrures, ce qui annihile la surélévation du tube.

Les supports des étriers doivent donc être placés à l'extérieur du tube de soutènement du forage et être plus hauts que le sommet du tube, comme indiqué sur les schémas.

• **Tubes d'exhaure**

Les tuyaux où circule l'eau pompée partent nécessairement latéralement vers le réseau d'alimentation ou d'arrosage. Mais ces tuyaux ne doivent pas percer le tube de soutènement du forage :

- Pour un forage simple -de type agricole ne fonctionnant qu'en période estivale- où le sommet du tube est au-dessus du sol, le tuyau d'exhaure passe au-dessus du tube, comme indiqué sur la figure 11a.
- Pour une tête de puits dans une cave -ce qui est le cas habituel pour les captages d'eau potable qui fonctionnent toute l'année, donc en période de gel- les tuyaux passent par une chambre qui peut accueillir le compteur volumétrique, les dérivations, ... (cf. fig. 11b). Cette chambre doit être drainée comme la cave de tête de puits (cf. § 9.2). L'étanchéité du passage de la conduite dans les parois de la chambre est alors facile à contrôler.

• **Câbles électriques**

Les précautions sont identiques à celles des tuyaux d'exhaure.

La traversée des parois est souvent le point faible des captages, pour l'étanchéité.

10. Comblement

Lorsqu'un ouvrage ne peut -ou ne doit pas- être réhabilité, il devra être comblé pour qu'il ne puisse être un vecteur de pollution vers les nappes d'eau souterraine. C'est volontairement que nous n'emploierons pas le terme « rebouché », pour éviter qu'un ouvrage soit condamné par une simple plaque qui le ferme, comme on rebouche une bouteille (cf. fig. 12).

10.1. PUIS EN NAPPE LIBRE (fig. 12)

La protection consistera à empêcher les eaux superficielles de pénétrer dans le puits.

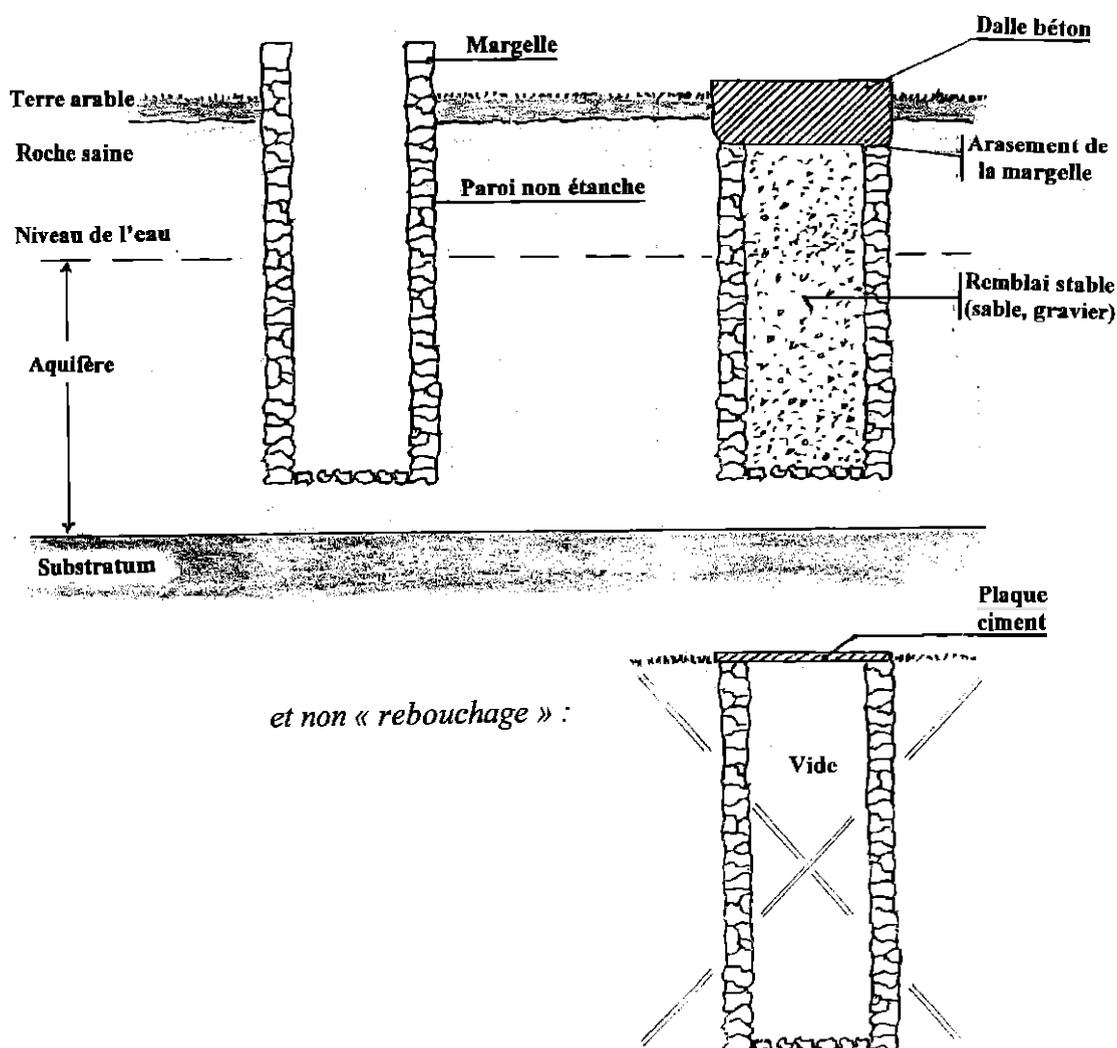


Fig. 12 - Puits.

Descriptif des travaux

- Arasement de la margelle jusqu'à la roche saine compacte, ou imperméable.
- Comblement du puits par un matériau stable, inerte (cailloux, gravier, sable siliceux) jusqu'à la profondeur de la margelle arasée.
- Coulage d'une chape de béton qui formera un socle au-dessus du terrain naturel pour éviter toute stagnation d'eau.
- Si la terre doit être cultivée, cette dalle sera enterrée à 1,5 m de profondeur environ et recouverte de terre arable identique à celle environnante.

10.2. FORAGE EN NAPPE UNIQUE CAPTIVE (fig. 13)

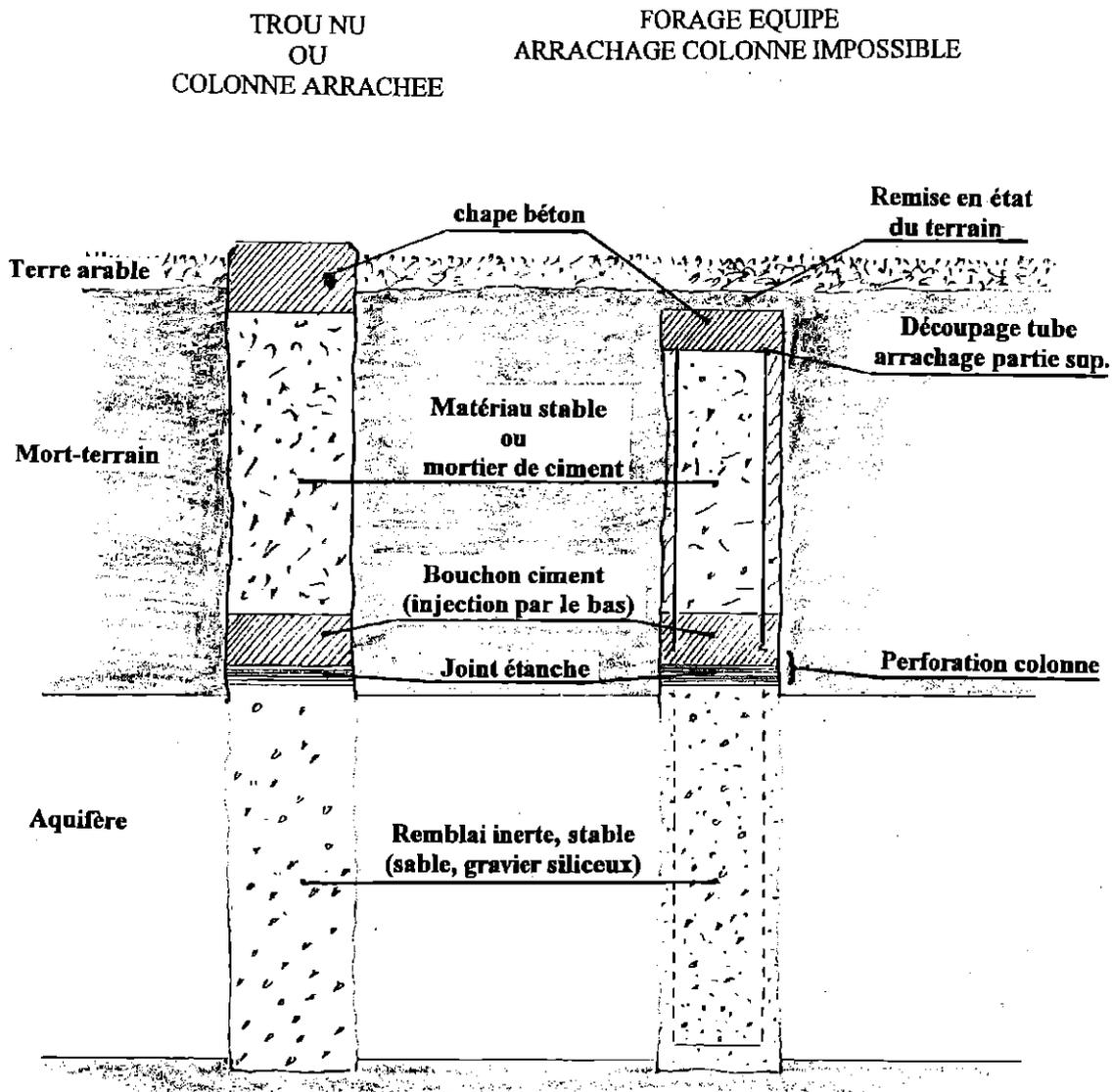


Fig. 13 - Forage en nappe unique captive.

L'objectif est de restituer l'imperméabilité de la couverture, au moins juste au-dessus de l'aquifère.

Dans ce cas, il convient d'essayer d'arracher la colonne en place, car il est plus facile de combler un trou nu. En cas d'impossibilité ou d'échec, les travaux consisteront en :

- Comblement de la partie inférieure -face à l'aquifère- par un matériau stable, inerte (gravier, sable siliceux) jusqu'au toit de l'aquifère.
- Découpage ou perforation de la colonne à la base de la couverture de l'aquifère, dans le cas où la ressource doit être parfaitement protégée.
- Mise en place d'un joint d'étanchéité (boulettes d'argile gonflante, Sobranite, ...).
- Mise en place, par canne d'injection, d'un bouchon de ciment.
- Remblaiement de la colonne par un matériau inerte, stable, si la cimentation jusqu'en haut n'est économiquement pas justifiable.
- Pour le sommet de l'ouvrage, 2 cas :
 - . Pas de contraintes d'occupation du sol : le sommet du tube reste au-dessus du sol. Coulage d'une chape recouvrant le sommet du tube et formant un socle de forme conique comme sur la figure 9.
 - . Remise en l'état du terrain, pour cultures par exemple :
 - . tube arasé vers 2 m de profondeur ;
 - . arrachage de la partie supérieure de ce tube ;
 - . coulage d'une chape de ciment jusque vers 1,5 m de profondeur ;
 - . recouvrement par de la terre arable.

10.3. FORAGE EN NAPPES SUPERPOSÉES (fig. 14)

Dans ce contexte, il est impératif de condamner le forage pour éviter un échange permanent entre les deux nappes.

Descriptif des travaux

- Comblement de la partie inférieure -face à l'aquifère inférieur- par un matériau stable, inerte (gravier, sable siliceux) jusqu'au toit de cet aquifère.
- Découpage ou perforation de la colonne crépinée face à l'écran imperméable qui sépare les deux aquifères.
- Mise en place d'un joint d'étanchéité (boulettes d'argile gonflante, Sobranite, ...).
- Mise en place, par canne d'injection, d'un bouchon formé par un laitier de ciment.
- Remblaiement de la colonne crépinée par un matériau inerte, stable, ou complément de la cimentation jusqu'en haut.

- Pour le sommet de l'ouvrage, 2 cas, comme précédemment :
 - . Pas de contraintes d'occupation du sol : le sommet du tube reste au-dessus du sol. Coulage d'une chape recouvrant le sommet du tube et formant un socle de forme conique comme sur la figure 9.
 - . Remise en l'état du terrain, pour cultures par exemple :
 - tube arasé vers 2,5 m de profondeur ;
 - arrachage de la partie supérieure de ce tube ;
 - coulage d'une chape de ciment jusque vers 1,5 m de profondeur ;
 - recouvrement par de la terre arable.

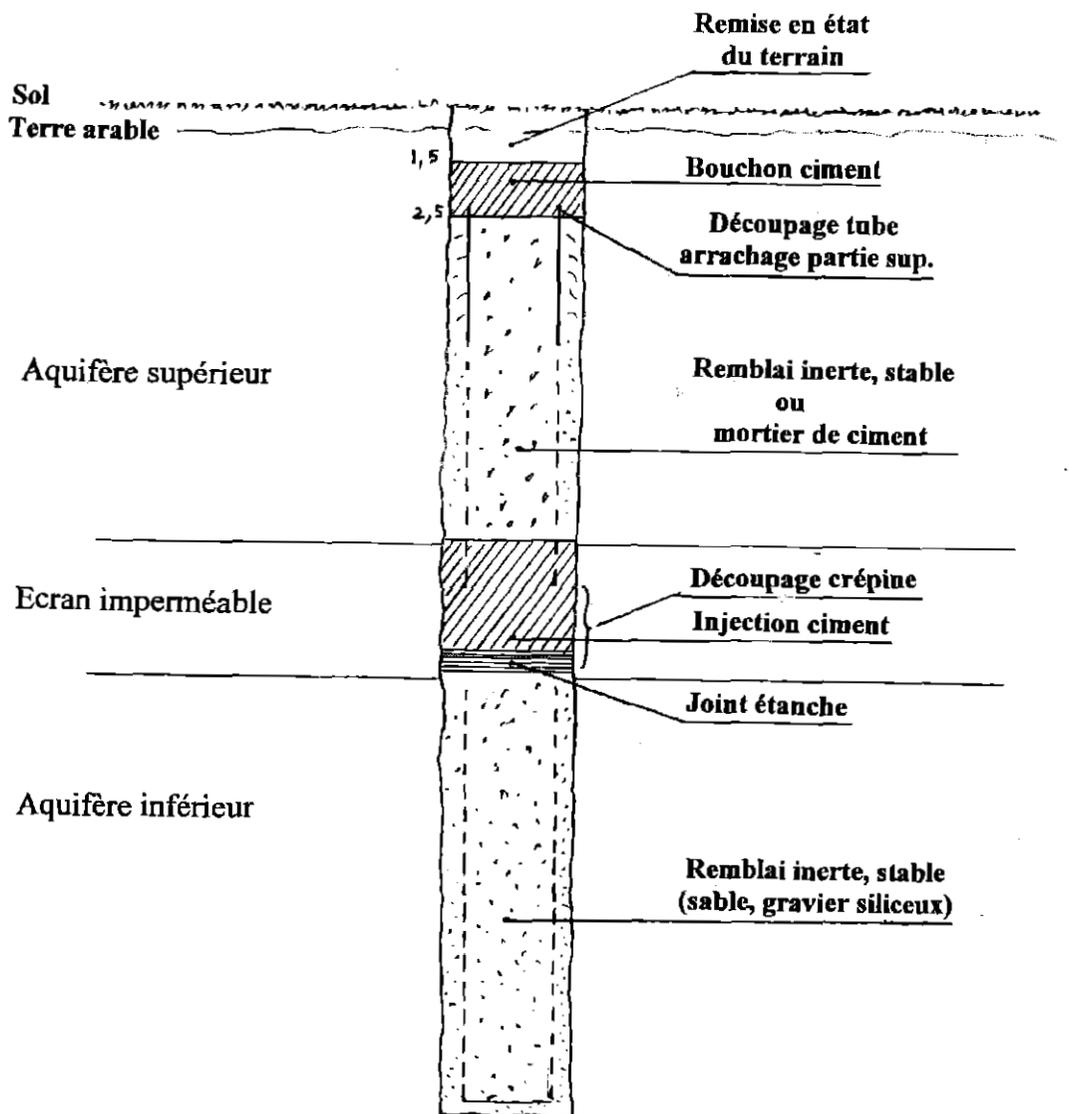


Fig. 14 - Forage captant deux nappes.

11. Conclusion

La réhabilitation d'un ouvrage couvre un domaine très vaste et complexe et ce rapport n'en traite qu'une petite partie : la mise en conformité vis-à-vis d'une réglementation ou des règles de l'art.

Dans ce seul domaine, il n'existe pas de règle simple, standard ; une réhabilitation dépend de la nature de l'ouvrage, de la configuration des aquifères, de la lithologie. Dans le cas complexe de superposition de 2 formations aquifères, on voit qu'il est absolument nécessaire de connaître la géologie des terrains traversés et la composition du forage ; ce qui implique que tout maître d'ouvrage doit exiger un document de fin de travaux de la part du foreur ou de faire suivre les travaux par un bureau d'étude compétent.

Ce rapport expose l'aspect technique de la réhabilitation ; il reste deux autres aspects : la responsabilité et le financement :

- la responsabilité : qui est responsable d'un ouvrage mal conçu : le maître d'ouvrage, le foreur ? Et comment exiger la réhabilitation d'un forage ?
- le financement : c'est l'obstacle principal aux réhabilitations prescrites. Un maître d'ouvrage se déclarant non responsable n'acceptera pas de prendre en charge les frais d'une réhabilitation.

La protection sans cesse plus contraignante de l'environnement, la difficulté croissante de trouver de l'eau potable rendent de plus en plus nécessaire d'envisager la réhabilitation d'ouvrages. Ce rapport répond aux problèmes les plus courants dans la région, mais il convient de répondre aussi aux aspects législatifs et juridiques.

Bibliographie

Note : la liste des documents suivants se rapporte à des ouvrages généraux, non à des opérations ponctuelles pour tiers, non publiques. De même sont exclus les rapports se rapportant aux forages pétroliers ou géothermiques.

Agence de l'Eau Loire-Bretagne (1992) - « Le forage d'eau ». Actes de la journée technique 28 octobre 1992.

Bourgeois M. (1976) - « La corrosion et l'incrustation dans les forages d'eau (choix de l'équipement adapté) ». Rap. BRGM n° 76 SGN 379 AME.

Bourguet L., Gattelier C. (1984) - « Colmatage des forages, causes et remèdes ». Bull. BRGM Hydrogéologie, n° 1.

Collectif BRGM « Dossier technico-commercial de développement du produit diagnostic et réhabilitation des forages ». Rap. n° 86-SGN-663-AQI.

Detay M. (1993) - « Le forage d'eau. Réalisation, entretien, réhabilitation ». Ed. Masson. « L'optimisation et la réhabilitation des forages par le dispositif de distribution uniforme d'afflux, Eucastream ». J.L. Wathélet. ISSN 0246-1641. DA 1994, n°4, p.15-24.

« Guide de bonne pratique et de contrôle des forages d'eau pour la protection de l'environnement ». BRGM. *Manuels et méthodes*, n° 31. Ed. BRGM 1998.

Kergosien R., Loges D., Meyer M. (1994) - « La régénération des puits et forages ». L'eau, l'industrie, les nuisances. ISSN 0755-5016 1994. n° 170, p. 38-41.

Lallemand-Barrès A. (1985) - « Colmatage - décolmatage, étude documentaire ». Rap. BRGM n° 85 SGN 030 EAU.

Laugat R. « Pratique du forage d'eau ». SEESAM-édition. Ed. 1990.

Laurent J. (1988) - « Entretien et réhabilitation des ouvrages de captage : les effets du vieillissement ». Génie rural. ISSN 0395-8663. n°12, p. 69-72.

Laurent J., Le Guyader M., Bonnefoy A. (1989) - « La réhabilitation des ouvrages de captages ». Travaux. ISSN 0041-1906. n° 647, p. 64-68.

Le Guyader M. (1991) « L'entretien et la réhabilitation des ouvrages de captage d'eau (puits et forages) ». Travaux. ISSN 0041-1906, n° 667, p. 11-13.

- Less C. - (1994) « Borehole rehabilitation and stimulation –a basic overview of selected techniques and their application ». *Africa Geoscience Review*. DA 1994. vol. 1, n° 1, p. 21-26.
- Maïau C. Neiss B., Ricour J.. (1986) - « Traitement d'entretien ou de réhabilitation de forages d'eau ». Revue *TSM - l'eau*.
- Puhlmann D. (2000) - « Brunnenbau : Brunnenalterung : Regenerieren oder Sanieren ? » (Well constructions : Well alteration : To regenerate or to rehabilitate).. BBR. Wasser und Rohrbau. ISSN 0937-3756. *DEU*, vol. 51, n° 8. p. 26-32.
- « Réhabilitation des forages. Journée d'information et d'échanges du 10 octobre 2000 ». Copie des transparents. BRGM.
- Van Beek (1989) « Rehabilitation of clogged discharge wells in the Netherlands ». CGEM. Quaterly journal of engineering geology. ISSN 0481-2085, vol. 22, n° 1, p. 75-80.
- Wilken R.D. (2000) - « Zur Reinigung von Brunnen mit Ultraschall unter Druck ».. BBR. Wasser und Rohrbau. ISSN 0937-3756. *DEU*, vol. 51, n° 1, p. 32-36.

ANNEXE 1

Schéma-organigramme synthétique

SCHEMA-ORGANIGRAMME SYNTHETIQUE

