

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

contribution a l'étude de la réhabilitation des forages d'eau
(cas du forage de Merksane) .

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0003-15

APA Citation (APA توثيق):

Atoussi, Abdesselam (2015). contribution a l'étude de la réhabilitation des forages
d'eau (cas du forage de Merksane)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، الدوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE URBAINE

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option : Alimentation en eau potable

THEME :

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA REHABILITATION
DES FORAGES D'EAU (CAS DU FORAGE DE MERKSANE)**

PRESENTE PAR :

ATOUSSE Abdesselam

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
M ^r AMMARI Abdelhadi	M.C.B	Président
M ^r BOUFEKANE Abdelmadjid	M.A.A	Examinateur
M ^{me} HOULI Samia	M.A.A	Examinatrice
M ^r HACHEMI Abdelkader	M.A.A	Promoteur

Avril - 2015

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, de m'avoir octroyé les moyens pour être où j'en suis aujourd'hui.

Mes plus grands remerciements sont naturellement pour Mr, HACHEMI qui m'a encadré tout au long de ma thèse. Ma considération est inestimable.

Mes plus grands remerciements :

Aux membres du jury qui me feront l'honneur d'examiner mon travail.

Tous les enseignants qui ont contribué à ma formation du primaire jusqu'au cycle universitaire ;

Une pensée affectueuse va à mes amis : Khalifa, Ali Ligili,

Sadik, Nichmi et Mahfoudi.

Un merci à tout mes amis de l'école chacun avec son nom.

Ces avant-propos seraient incomplets sans un remerciement adressé aux membres de ma famille, en particulier mes parents. Ce travail leur appartient tous.

Atoussi

Dédicace

A mes très chers parents qu'ont toujours été là pour moi et qui m'ont donné un magnifique modèle du beur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mes amis d'étude.

A mon frère : Abderahmen.

A mes oncles maternels et paternels.

A mes amis : K̄halifa et Othman.

A mes amis : et tous mes amis de l'école.

ملخص :

ان الآبار المستخدمة في استغلال المياه الجوفية لغرض التزود بمياه الشرب معرضة لعوامل طبيعية كانت او غير طبيعية تنقص من مردودها.

لهذا يجب صيانتها وإعادة تأهيلها لتجنب غلقها واستحداث أخرى جديدة مما يرفع من تكاليف المشروع.

يهدف هذا العمل الى تبيان المنهجية وطرق صيانة وتأهيل آبار مياه الشرب كما قدمنا مثالا لإعادة تأهيل بئر مركسن بولاية اليزي.

كلمات مفتاحية : آبار, مياه جوفية, صيانة, إعادة تأهيل.

RESUME :

Les forages utilisés dans l'exploitation des eaux souterraine pour l'alimentation en eau potable sont exposés aux facteurs naturels et non-naturels qui diminuent leurs rendements.

Alors, il est indispensable de les entretenir et les réhabiliter pour éviter leur comblement et la création d'autre forages ce qui augmente les couts du projet.

Ce travail a pour but de démontrer la méthodologie et les techniques d'entretien et de réhabilitation des forages d'eau potables, enfin nous avons donné un exemple de réhabilitation du forage MERKSANE de la willaya d'ILLIZI.

Mots clé : Forages, eau souterraine, entretien, réhabilitation.

ABSTRACT:

The drilled boreholes used in underground exploiting water, are exposed for natural and non-natural agents that reduces its yield thus we have to maintain and rehabilitate it to avoid getting closed which will increase the costs due to the need to create new ones. This work aims to show the methodology and the techniques of maintenance and rehabilitation of drilled boreholes and the right method to deal with it. We presented an example of rehabilitation and maintenance of MERKSANE drilled borehole in the state of ILLIZI.

Keywords: drilled borehole, underground water, maintenance, rehabilitation.

SOMMAIRE

Problématique et objectif.....	01
INTRODUCTION GENERALE.....	02

Chapitre I : Le forage d'eau et la nappe souterraine.

I.1 Introduction	04
I.1 Notion hydrogéologique	04
I.1.1.Un aquifère	04
I.1.2. Nappes d'eau.....	04
I.1.3.Types des nappes.....	04
I.1.3.1.Aquifère à surface libre et type de forage d'eau son dépendant	04
I.1.3.2. Nappe captive	05
I.1.3.3.Aquifère à nappe semi captive ou à drainante.....	06
I.2. Forage d'eau	07
I.2.1.Définition.....	07
I.2.1.1.Forage.....	07
I.2.1.2.Puits	07
I.2.1.3.Forage d'eau	07
I.2.2.Configuration des forages d'eau :.....	08
I.2.2.1.Configuration d'un forage en nappe libre :.....	08
I.2.2.2.Configuration d'un forage en nappe captive	09
I.2.3.L'équipement des forages d'eau	09
I.2.3.1.Tubages	09
I.2.3.2.Les Crépines.....	10
I.2.3.2.1.Types de crépines.....	10
I.2.3.3.Massif Filtrant (gravies additionnel).....	11
I.2.3.4. Ciment.....	11
I.2.4.Mise en place L'équipement de forage (crépines et massif de gravier).....	12
I.2.5.Équipement d'exhaure dans le forage.....	13
I.3. Eaux souterraine	14
I.3.1.Types d'eau souterraine.....	14
I.3.2.Caracteristiques des eaux souterraines	15
I.3.2.1.Propriétés physiques de l'eau.....	15
I.3.2.2.Hydrogéochimie des eaux souterraine.....	16
I.3.2.2.1.Caracteristiques chimiques des eaux souterraines.....	16
I.3.2.2.2.Faciès chimiques des ions majeurs des eaux souterraines.....	16
I.3.2.2.3.Propriétés chimiques des eaux souterraines.....	17
I.3.2.3.Diffirant types d'eau selon leur qualitatif.....	17

I.4. Hydrodynamique de l'eau dans les matériaux (aquifère, massif).....	18
I.4.1. Paramètres hydrogéologique des matériaux (de aquifère, de massif).....	18
1. Porosité.....	18
2. Perméabilité (k)	18
3. Conductivité hydraulique (K).....	19
I.4.2. Caractéristiques hydrodynamiques des milieux poreux.....	20
I.4.3. Régime d'écoulement des eaux souterraines.....	21
I.4.4. Mécanisme de transport.....	21
I.5. Variables et paramètres régissant les écoulements autour de forage d'eau	22
I.5.1. Charge hydraulique	22
I.5.2. Gradient hydraulique	22
I.5.3. Perméabilité et transmissivité.....	23
I.5.4. Notion de rabattement	24
I.5.4. Autres paramètres liés à l'ouvrage (forage)	24
I.6. Notions qui identifient et caractérisée d'un forage d'eau.....	25
I.7. Ecoulement autour des forages d'eau.....	28
I.7. Problèmes posés par l'eau souterraine.....	28
Conclusion.....	29

Chapitre II : Les Technique de réhabilitation.

II.1. Introduction	30
II.2. Techniques de traitement	30
II.2.1. Technique de dissolution des dépôts et des incrustations	30
II.2.1.1. Les techniques mécanique	30
II.2.1.1.1. Traitement ou Nettoyage par brossage.....	30
II.2.1.1.2. Traitement par pistonnage	31
II.2.1.2. Techniques physique.....	32
II.2.1.2.1. Traitement par pompage alterne.....	32
1) Premier procédé	32
2) Deuxième procédé	32
3) Troisième procédé	32
II.2.1.2.2. Traitement par jet.....	32
1- Procédé de technique	33
II.2.1.3. Traitement par effet d'onde de choc de cisaillement.....	34
II.2.1.3.1. Tir à l'explosif.....	34
II.2.1.3.2. Technique air burst.....	34
II.2.1.3.3. Fracturation hydraulique.....	35
II.2.1.3.4. Procédé Hydropuls	35
II.2.1.3.4.1. Description du procédé Hydropuls	35
II.2.1.3.4.2. Caractéristiques du procédé Hydropuls	36
II.2.1.3.4.3. Avantages du procédé hydropuls.....	37
II.2.1.4. Traitement pneumatique (air lift)	37

II.2.1.4.3.Méthode de procédé d'air lift	40
II.2.1.5. Techniques chimiques.....	41
II.2.1.5.2.Traitement au chlore	44
II.2.1.5.3.Traitement par Phosphatage.....	45
II.2.1.5.4.Traitement aux polyphosphates.....	46
II.2.1.5.4.Traitement au CO ₂	46
II.2.2. Techniques contre la Corrasion.....	47
1) Protection par isolation.....	47
2) Protection passive par revêtements	48
3) Protection cathodique.....	48
4) Réduction la vitesse de passage de l'eau à travers la crépine.....	49
II.3. Techniques de transformations (rénovation).....	50
1) Retubage.....	50
2) Chemisage.....	51
3) Doublage des crépines	54
Conclusion.....	54

Chapitre III : La Méthodologie de Réhabilitation.

III.1.Introduction	55
III.2.Quand réhabilité un forage d'eau.....	55
A- Réduction de la capacité spécifique :.....	55
B - Venue de sable.....	55
C- Autre symptômes	56
III.3.Les critères de réhabilitation.....	56
III.4.Méthodologies de réhabilitation.....	57
III.4.1. Collecte d'archives et d'informations.....	58
III.4.2. Réparation mécanique.....	58
III.4.3. Examen rapide	59
III.4.4. Auscultation à l'aide d'une caméra vidéo.....	59
III.4.5. Diagnostic du forage.....	60
III.4.5.1. Phénomène de (colmatage) incrustation.....	61
III.4.5.2. Phénomène de corrosion.....	64
III.4.5.2.1. Différentes formes de corrosion.....	64
III.4.5.3. Érosion	67
III.4.5.4. Autre phénomènes qui peut toucher l'ouvrage(les équipements de forage).....	68
III.4.6. Décision et Choix la technique de réhabilitation.....	70
III.4.7. Traitement de forage.....	70

III.4.7.1. Traitement contre l'incrustation (colmatage).....	71
III.4.7.1.1. Le traitement chimique.....	71
III.4.7.1.2. Traitements physique.....	73
III.4.7.2. Traitement contre la corrosion.....	75
III.4.7.2.1. Renouvellement.....	75
III.4.7.2.2. Recommandation.....	75
III.4.7.2.3. Protection contre la corrosion.....	76
III.4.7.3. Aménagement de tête de forage.....	76
III.4.7.3.1. Aménagement hors sol.....	76
III.4.7.3.2. Tête de puits dans une cave.....	77
III.4.7.3.3. Equipement d'exhaure.....	78
III.4.8. Stérilisation de forage.....	79
III.4.9. Vérification et Test par paliers de débit.....	81
III.5. Conclusion.....	82

Chapitre IV : Etude de cas.

IV.1. Introduction.....	83
IV.2. Présentation du forage de la MERKSANE.....	84
IV.2.1. Localisation du forage de la MERKSANE.....	84
IV.2.2. Caractéristiques de forage MERKSANE.....	84
IV.2.3. Type de forage.....	84
IV.2.4. Les équipements de forage.....	84
IV.2.5. Importance de forage de MERKSANE.....	84
IV.3. Pourquoi réhabilitation le forage de MERKSANE.....	85
IV.4. Etude de réhabilitation du forage.....	86
IV.4.1. Collection des informations.....	86
IV.4.2. Réparation mécanique.....	86
IV.4.3. Examen rapide :.....	87
IV.4.4. Auscultation à l'aide de caméra vidéo.....	87
IV.4.5. Diagnostic.....	94
IV.4.6. Décision.....	94
IV.4.7. Choix de technique.....	94
IV.4.8. Traitement de forage.....	95
IV.4.9. Stérilisation de forage.....	95
IV.4.10. Vérification et Test de débit.....	95
IV.5. Conclusion.....	96
CONCLUSION GENERALE.....	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.01 : Valeurs de propriétés physiques de l'eau pour différentes températures	16
Tableau I.02 : valeurs de porosité et de perméabilité de certains matériaux.....	20
Tableau I.03 : Perméabilités de certaines formations.....	23

LISTE DES FIGURES

Figure I.01 : Un Aquifère à surface libre.....	05
Figure I.02 : Nappe captive.	06
Figure I.03 : Un forage artésienne jaillissant réalisée a Formon, dans le Sud d’Haiti.....	06
Figure I.04 : Aquifère semi captive.....	06
Figure I.05 : Schéma principale de type des nappes dans un aquifère.....	07
Figure I.06 : Schéma type d’un forage d’eau	08
Figure I.07 : Forage en nappe libre réalisé en une seule étape et en un seul diamètre	08
Figure I.08 : Forage traversant une nappe libre et captant une nappe captive.....	09
Figure I.09 : Différents type de crépines en acier.....	11
Figure I.10 : Aspect des crépines et massif filtrant en place.....	13
Figure I.11 : Différente type d’eau souterraine	14
Figure I.12 : Forces d'attraction moléculaire	15
Figure I.13 : Expérience de Darcy appliquée à l’écoulement horizontal d’une nappe.....	19
Figure I.14 : Abaque de la conductivité hydraulique selon le type de roche.....	20
Figure I.15 : Principaux phénomènes intervenant dans le transport de soluté en milieu poreux (d'après Benslimane, 1997).....	21
Figure I.16 : Charge hydraulique : cas d'une nappe libre et d'une nappe captive.....	22
Figure I.17 : Gradient hydraulique.....	23
Figure I.18 : Relations perméabilité, débit, rabattement dans un captage.....	24
Figure II.01 : Etapes de brossage par brosse métallique.....	30
Figure II.02 : Autre type de brossage est raccordée avec tige de rotation.....	31
Figure II.03 : Le piston de nettoyage.....	31
Figure II.03 : Développement par lavage au jet.....	33
Figure II.04 : Influence du type d’ouverture de la crépine sur l’efficacité du développement au jet sou pression.....	33
Figure II.05 : Les types de traitement par air burst.....	34
Figure II.06 : Les moyens et Mise en oeuvre de hydropuls	36
Figure II.07 : Répresente les moyens et Mise en œuvre de hydropuls.....	37
Figure II.08 : Les équipements de développement pneumatique.	39
Figure II.09 : Réhabilitation d’un forage par air lift.....	40
Figure II.10 : Pompe d’injection et son réservoir des produits chimique.....	41
Figure II.11 : Modes d’acidification.....	44
Figure II.12 : Mise en œuvre le CO ₂	46
Figure II.13 : Traitement des tubages contre la corrosion.....	47
Figure II.14 : Le Série galvanique.	49
Figure II.15 : Rénovation des équipements de forage.....	51
Figure II.16 : L’effecacite de rechnimesage.....	52
Figure II.17 : étapes réparation par le procédent Swage Packer	52

Figure II.18: étapes rechimesage par l'obturateur	53
Figure II.19 : Les étapes de montage du déroulement d'une réparation avec « swage packer »	54
Figure III.01 : Aspect d'eau avant la réhabilitation.....	55
Figure III.02 : réparation mécanique.....	58
Figure III.03: Les moyens d'auscultation des forages d'eau.....	60
Figure III.04 : Exemple de colmatage des crépines.....	61
Figure III.05 : Développement bactérien.....	63
Figure III.06 : Aspect de l'effet de la corrosion sur l'équipement de forage.....	64
Figure III.07 : Quelques phénomènes détectée à l'aide de l'auscultation.....	69
Figure III.08 : Quelques phénomènes graves trouvées à l'aide de l'auscultation.....	69
Figure III.09 : Schéma de l'équipement des forages pendant le traitement à l'acide chlorhydrique.....	72
Figure III.10 : Préparation du matériel pour le brossage mécanique et le curage air-lift.....	74
Figure III.11: Récupération du mélange eau, air et dépôts lors du nettoyage par air lift.....	74
Figure III.12 : Quelques photo pendant la rechemisage.....	75
Figure III.13: Aménagement minimal d'une tête de forage.....	76
Figure III.14 : Aménagement d'une tête de puits dans une cave.....	77
Figure III.15 : Aménagement d'exhaure.....	78
Figure III.16 : Remise en place d'une colonne inox à raccords rapides.....	79
Figure III.17: Le sable accumulé au fond du forage se dépose dans le bac de décantation.....	80
Figure III.18 : Remise en service de la colonne de refoulement.....	80
Figure III.19a : Comparaison avant et apres la rehabilitation	81
Figure III.19b : Courbe du rabattement en fonction du débit avant et après réhabilitation ...	81
Figure III.20 : Aspect d'eau après les Test par palaire de débit.....	82
Figure IV.01 : Le forage de MERKSANE.....	83
Figure IV.02 : Les équipements de forage MERKSANE.	84
Figure IV.03 : Système d'alimentation de MERKSANE	85
Figure IV.04 : Les causes visualisée provoque la réhabilitation de forage MERKSANE.....	86
Figure IV.05 : Quelques visualisation de l'examen rapide de forage MERKSANE.....	87
Figure IV.06 : Auscultation du forage de MERKSANE à la partie profondeur 8.17m a 18.37m.....	88
Figure IV.07 : Auscultation du forage de MERKSEN à la partie profondeur 8.17m a 18.37m.....	89
Figure IV.08 : Auscultation du forage de MERKSEN à la partie profondeur 10,90m a 12,82m.	89
Figure IV.09 : Auscultation du forage de MERKSANE à la profondeur 17,50m.....	90
Figure IV.10 : Auscultation du forage de MERKSAN à la partie profondeur 8.17m a18.37m	90
Figure IV.11 : Auscultation du forage de MERKSANE à la partie profondeur 21,60m a 27,50m.....	91

Figure IV.12a : Auscultation du forage de MERKSEN à la partie profondeur 269,60 a 271,94m.....	92
Figure IV.12b : Auscultation du forage de MERKSEN à la partie profondeur 269,60 a 271,94m.....	93
Figure IV.13 : L'état de tête de forage de MERKSANE.....	95

Problématique et Objectifs

Problématique et objectifs du présent mémoire :

Un ouvrage de captage, comme toute chose, a une durée de vie. Cette durée de vie varie en fonction de l'exploitation de l'ouvrage, de la qualité de l'eau ainsi que des caractéristiques de l'aquifère sollicité. On sera en mesure d'exploiter l'ouvrage durant 20 à 30 ans sans aucun problème. Mais dans certains cas, une perte d'efficacité significative peut être enregistrée durant la première année d'exploitation.

Le vieillissement des puits et forages est un phénomène inéluctable qui provoque un colmatage des voies d'eau de la crépine et de la formation aquifère naturelle ou artificielle adjacente (corrosion, dépôts incrustants, ensablement) et qui conduit à une diminution progressive du rendement de l'ouvrage.

Au fil du temps, la structure d'un ouvrage d'exploitation va se détruire par corrosion et mettre en communication toutes les formations géologiques au droit du forage. On risque par conséquent de mélanger des niveaux aquifères de mauvaise qualité avec des niveaux plus intéressants. Cela peut aboutir à la destruction partielle ou totale de productivité. A cette interférence entre niveaux géologiques, s'ajoute l'introduction dans les forages d'eau des eaux de surface comme des eaux de pluie, ou plus grave encore, des eaux polluées.

L'absence d'entretien et de réparation d'un puits peut conduire à la diminution voire à l'arrêt du pompage ou du puisage de l'eau en raison de pannes de fonctionnement. Elle est aussi la cause de la dégradation de la qualité de l'eau et donc la cause de maladies. De tels des fonctionnements conduisent chaque année dans le monde à l'abandon d'un nombre très important de puits creusés ou forés et à envisager d'engager si besoin une opération de réhabilitation. La sensibilisation et l'éducation des usagers au besoin et aux tâches de maintenance et d'entretien de l'installation sont donc indispensables pour l'exploitation durable d'un puits.

De point de vue économique, la réalisation d'autres forages remplaçant les forages détruits est coûteuse que de les réparer et les réhabiliter, sans oublier le temps de réalisation qui peut être long ce qui va provoquer une pénurie d'approvisionnement en eau potable.

Face à tous ces problèmes et ces événements auxquels les forages d'eau sont exposés, il est nécessaire donc de les réhabiliter et mettre un système de control et d'entretien afin de les conserver comme un moyen d'alimentation en eau potable et augmenter leur durée de vie.

De là, cette étude a pour objectifs :

- de présenter les problèmes qui confrontent l'exploitation des ouvrages de captage des eaux souterraines qui entraînent une baisse de productivité et une dégradation de la qualité des eaux ;
- D'exposer les différentes techniques de réhabilitation d'un ouvrage de captage ;
- Proposer une méthodologie de réhabilitation

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les émergences d'eaux minérales, qu'elles soient naturelles ou forées, sont des points qui correspondent à des lieux de circulation préférentielle, c'est-à-dire permettant une exploitation à un débit donné d'un fluide de qualité donnée et stable dans le temps.

Les forages constituent des points d'observation très intéressants donc très utilisés pour l'étude des gisements. Ces mêmes points peuvent aussi, si leur conception ne suit pas les règles de l'art, induire des nuisances importantes pour l'environnement. La mise en communication d'un niveau aquifère d'eau avec d'autres niveaux aquifères (supérieurs ou inférieurs, profonds ou de surface), par l'intermédiaire d'un forage, peut modifier les caractéristiques de l'eau concernée dont on sait qu'elles doivent rester constantes dans le temps.

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

La réhabilitation d'un forage existant est souvent plus économique que la construction d'un nouvel ouvrage. Elle est, en outre, plus simple et plus rapide à mettre en œuvre, et peut être une solution adaptée en situation d'urgence (elle ne nécessite pas la mobilisation d'un atelier de forage), cependant si le forage réhabilité doit être utilisé longtemps, il est important d'estimer en premier lieu son espérance de vie (la réhabilitation de forages endommagés n'est pas toujours une solution à long terme). Dans la pratique, il peut être envisagé de réhabiliter un forage quand :

- un forage en exploitation présente des anomalies (faible productivité, mauvaise qualité d'eau) ;
- un programme de réalisation de forages est en cours dans une zone où d'anciens forages existent (la réalisation de nouveaux forages et la réhabilitation de forages existants sont deux activités complémentaires) ;
- un programme d'entretien et de réparation de pompes est en cours (des travaux de réhabilitation de faible ampleur, comme le développement des forages, sont souvent réalisés dans le même temps).

Lorsque le vieillissement d'un ouvrage est constaté et sa cause principale identifiée, on peut songer à traiter l'ouvrage pour en régénérer au mieux les caractéristiques initiales. Mais une identification plus précise du phénomène contre lequel on veut lutter est indispensable, car certains remèdes mal adaptés ont des effets contraires à ceux recherchés. L'exemple classique est le traitement d'un mi Lieu avec argiles sodiques par des polyphosphates de sodium, qui ne contribue souvent qu'à augmenter le colmatage.(R.Degallier, 1985).

Notre mémoire va présenter les techniques de réhabilitation utilisées pour soit régénérer les forages endommagés ou pour améliorer leur productivité.

Le présent mémoire comprend quatre chapitres consacrés comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la description du forage d'eau et son environnement ;

Le deuxième chapitre présentera les techniques de réhabilitation d'un ouvrage de captage ;

Le troisième chapitre permettra de connaître la méthodologie de réhabilitation suivie.

Et enfin le quatrième chapitre sera consacré à une étude de cas.

Chapitre I :

Le forage d'eau et la nappe souterraine

Introduction :

Tout ouvrage pour le traiter il faut connaitre bien l'objectif et les éléments de ces ouvrages et son milieu pour obtenir les points fragiles qui peuvent être corrigés surtout dans la réhabilitation de ces ouvrages.

On va voir dans ce chapitre un ouvrage très important dans l'alimentation en eau potable qui est le forage d'eau (équipements); son milieu et leurs caractéristiques et les eaux souterraines et leurs caractéristiques.

I.1 Notion hydrogéologique :

I.1.1.Un aquifère :

Un aquifère peut être défini comme un "corps (couche, massif) de roches perméables à l'eau, à substrat et parfois à couverture de roches moins perméables, comportant une zone saturée et conduisant suffisamment l'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables". (Selon le comité national français des sciences hydrogéologiques).

I.1.2.La nappe d'eau :

Une nappe d'eau souterraine est définie comme un ensemble de l'eau comprise dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique". (Héricart de Thury.1829).

La nappe d'eau souterraine représente spécifiquement la partie saturée en eau du matériau aquifère. Les qualificatifs « libre, captif et semi-captif » s'appliquent aussi pour caractériser les nappes. Cependant, les définitions et les conditions de captivité ne sont pas les mêmes dans le cas des aquifères et des nappes. Bien que généralement les conditions naturelles de captivité de l'aquifère et de la nappe soient simultanées, on peut, dans quelques cas, observer une nappe libre dans un aquifère captif ou semi-captif. Cette dichotomie est cependant rare et souvent temporaire. La définition des nappes libres, captives et semi-captives est approchée à travers le potentiel de l'eau dans l'aquifère ou des fluctuations de la surface de la nappe d'eau.(O.Banton,M.Bangoy,1999).

I.1.3.Types des nappes :

On appelle nappe aquifère l'ensemble de l'eau circulant dans un milieu perméable et surface piézométrique est sa surface supérieure d'équilibre. (F. Renard. 2007).

I.1.3.1.Nappe à surface libre :

Nappe à surface libre est comprise dans un aquifère qui comporte une zone non saturée de caractéristiques semblables à celles de la zone saturée, et une zone de fluctuation. (Samsoen, 1941).

La figure I.01 représente la configuration la plus courante d'une nappe superficielle. La formation aquifère n'est pas saturée sur toute son épaisseur. Il existe entre la surface de la nappe et la surface du sol une zone de terrain non saturé contenant de l'air. Le niveau supérieur de la nappe est appelé niveau piézométrique, il se trouve toujours sous le niveau du sol. (CASTANY Gilbert.1982).

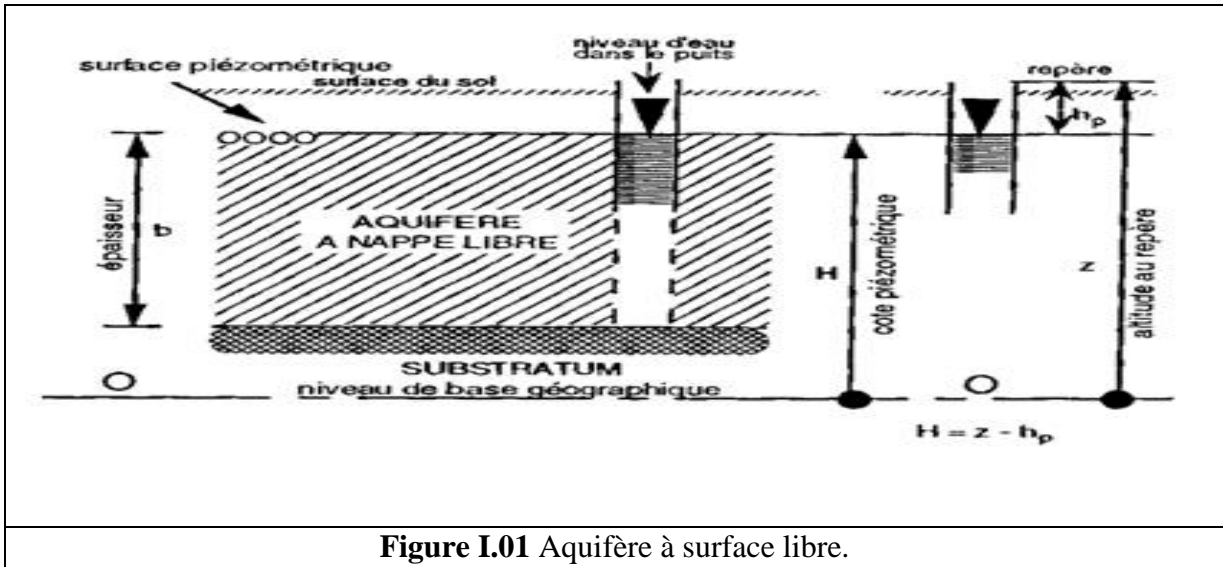


Figure I.01 Aquifère à surface libre.

I.1.3.2. Nappe captive :

Nappe captive, ou partie d'une nappe, sans surface libre, donc soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et dont la surface piézométrique est supérieure au toit de l'aquifère, à couverture moins perméable, qui la contient. S'oppose à nappe libre. (H. Boursault, 1900).

La formation représentée par la figure I.02 est un aquifère saturé sur toute son épaisseur ; il est limité vers le haut par une couche imperméable (argile) ou semi-perméable. Le niveau piézométrique, différent de celui de la surface de la nappe et toujours au-dessus de la base de la couche imperméable supérieure, est virtuel tant qu'un forage ou un piézomètre n'a pas atteint l'aquifère au travers de son toit, Un tel forage est appelé forage artésien. (CASTANY. Gilbert.1982). Le forage artésien est un forage captant l'eau d'une nappe captive, jaillissant ou non. (Arago 1834).

Et si l'eau remonte jusqu'à la surface (niveau piézométrique au-dessus de la surface du sol) on l'appellera forage artésien jaillissant. C'est-à-dire l'eau s'écoule naturellement sans pompage. (CASTANY. Gilbert, 1982) voir figure (I.03).

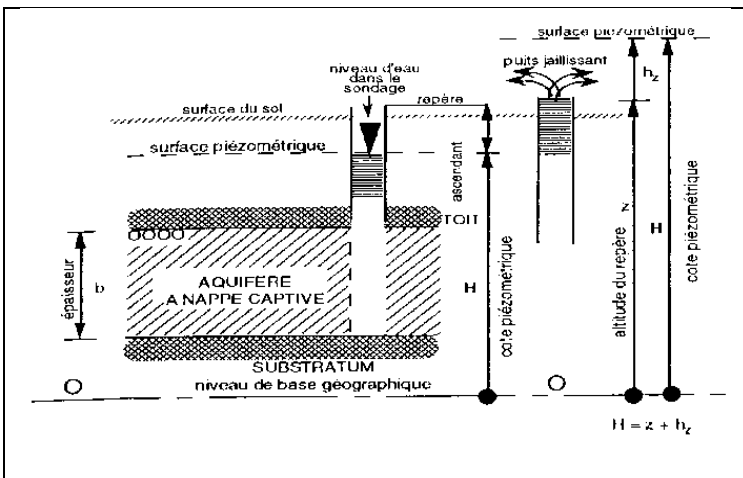


Figure I.02 : Nappe captive.
(CASTANY. Gilbert.1982)

Figure I.03 : Un forage artésien jaillissant réalisé à Formon, dans le Sud de Haïti. (Haïti, 1992)

I.1.3.3. Nappe semi captive ou à drainante.

L'importance du mécanisme de drainage, illustré sur la figure I.04 repose sur le fait que des volumes importants d'eau peuvent traverser des horizons imperméables ou semi-perméables lorsque la superficie de cet horizon est grande et qu'il existe une différence de pression de part et d'autres de cet horizon. Ce phénomène permet des échanges importants entre nappes superposées ou sous-jacentes au travers du substratum ou du toit en cas de différence de charge. On parle alors de nappes semi-captives avec substratum et toit semi-perméables. (CASTANY Gilbert, 1982).

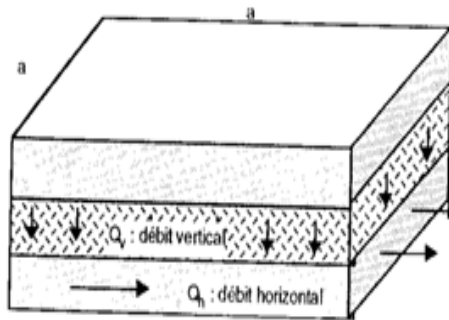
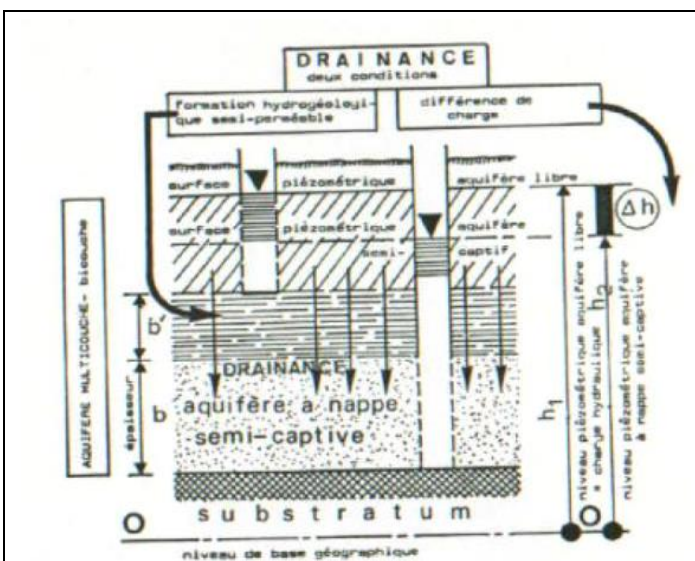
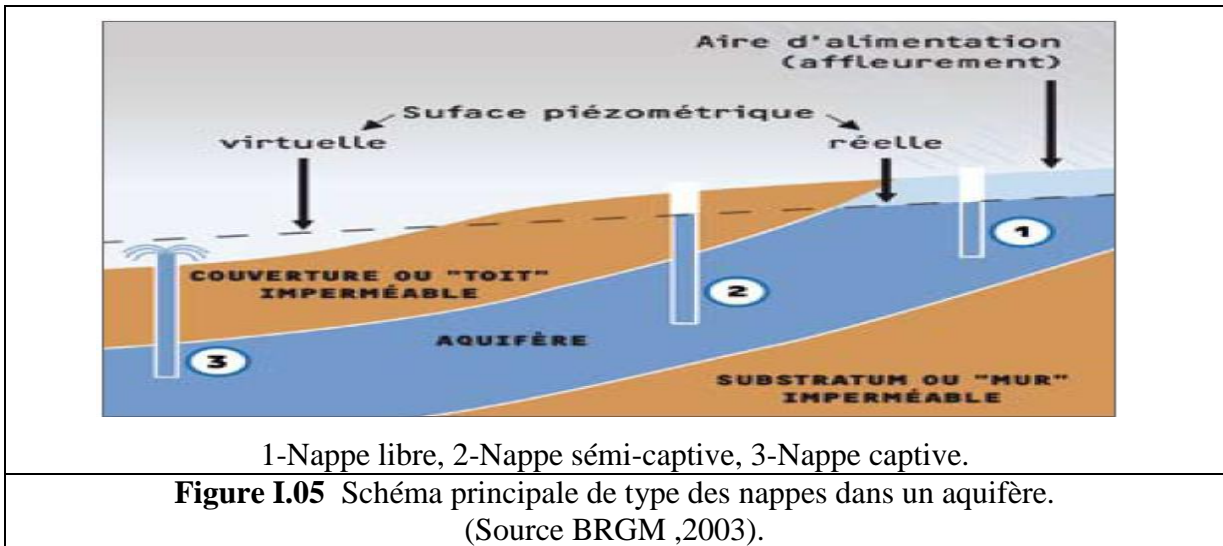


Figure I.04 : Aquifère semi captif. (CASTANY. Gilbert.1982)



1-Nappe libre, 2-Nappe sémi-captive, 3-Nappe captive.
Figure I.05 Schéma principale de type des nappes dans un aquifère.
(Source BRGM ,2003).

I.2.Le forage d'eau :

I.2.1.Définitions :

I.2.1.1.Forage : est Puits creusé par un procédé mécanique à moteur (foreuse) en terrain consolidé ou non consolidé, pour tous usages sauf pour les reconnaissances, distingué d'un puits foré. (G. Castany, J. Margat, 1977).

I.2.1.2.Puits : Toute excavation creusée à partir de la surface du sol et pénétrant un aquifère, utilisée pour puiser de l'eau ou pour agir localement sur la charge hydraulique dans l'aquifère ou plus largement pour d'autres usages (pénétration dans le sous-sol extraction). (G. Castany, J. Margat, 1977).

I.2.1.3.Forage d'eau : Les forages se caractérisent par leur petit diamètre (inférieur à 1 m et généralement compris entre 0,2 et 0,5 m), en comparaison avec leur profondeur, qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres, rarement au-delà de 1000 mètres (hormis en géothermie et en exploitation pétrolière).

Ces ouvrages permettent donc d'accéder à toutes les nappes souterraines, aussi bien libres que captives. Ils peuvent solliciter des horizons aquifères bien déterminés à l'aide de tubes crépines, en isolant les nappes indésirables par des tubages pleins et des cimentations. De même une cimentation annulaire est-elle réalisée en partie supérieure pour éviter l'apport d'eaux superficielles. (E.Gilli, C.Mangan, J.Mudry, 2004).

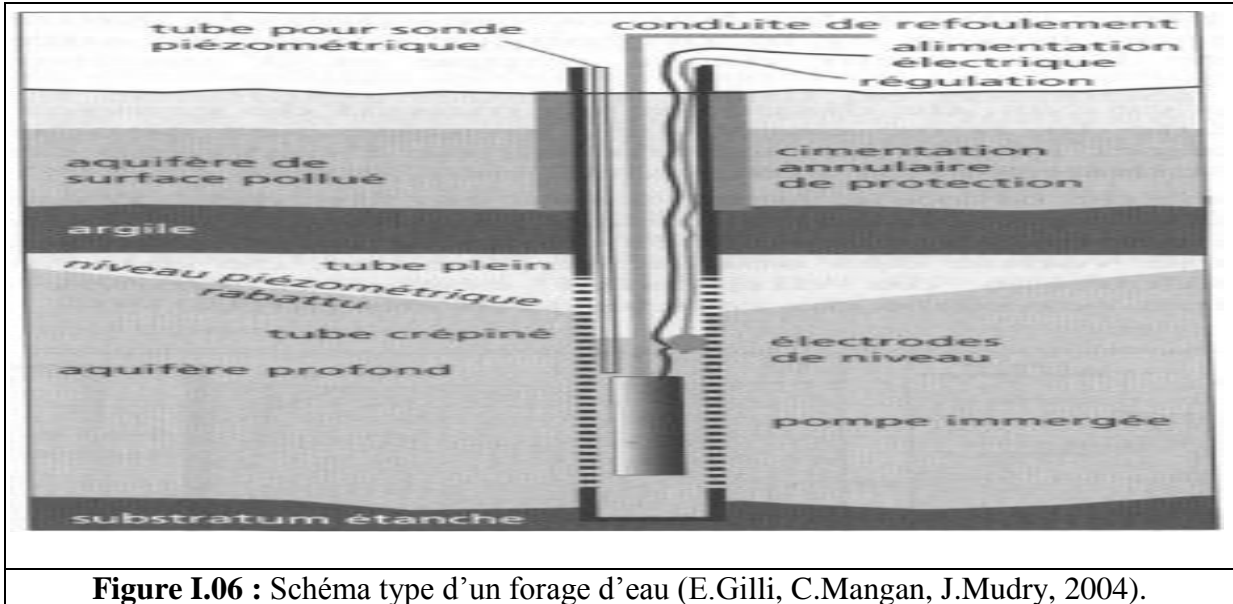


Figure I.06 : Schéma type d'un forage d'eau (E.Gilli, C.Mangan, J.Mudry, 2004).

I.2.2. Configuration des forages d'eau :

I.2.2.1. Configuration d'un forage en nappe libre :

La figure I.07 donne un exemple de configuration courante pour les forages de petit diamètre (de 150 à 250 mm) réalisés pour capter une nappe libre superficielle. Après creusement et pose du tubage de protection, le forage est généralement réalisé en une seule passe jusqu'au mur de la formation aquifère. (BRGM, 2003).

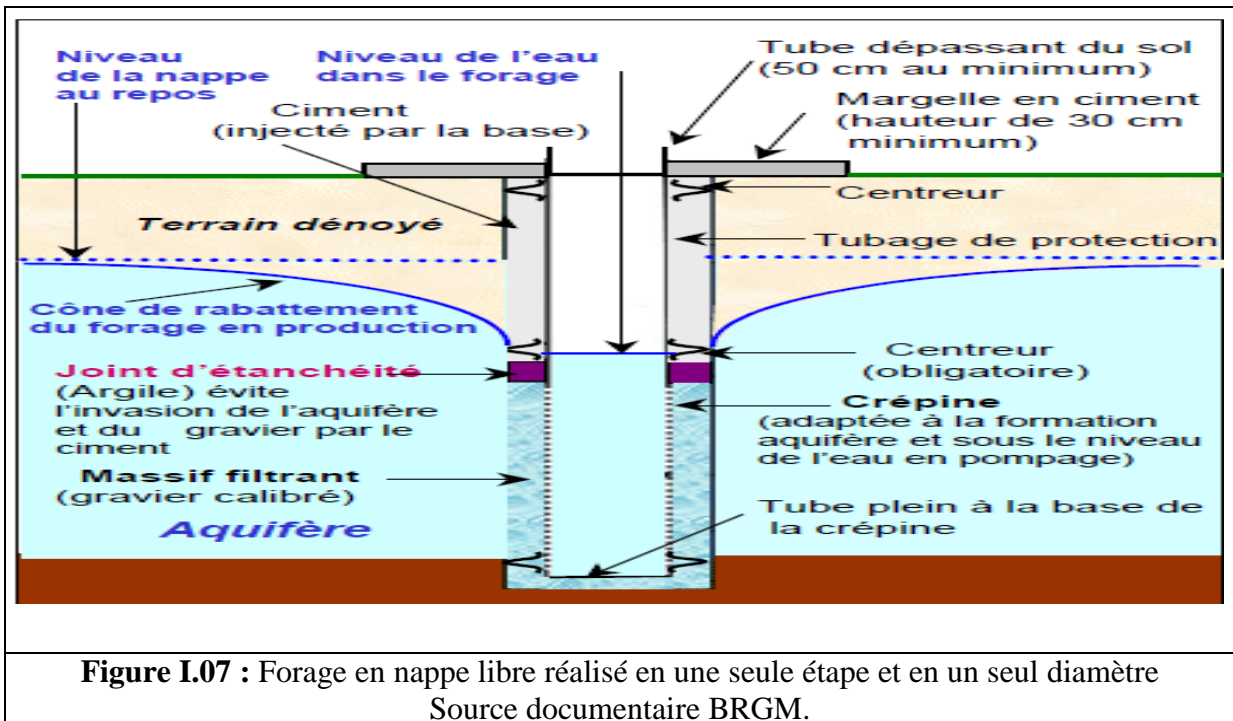


Figure I.07 : Forage en nappe libre réalisé en une seule étape et en un seul diamètre
Source documentaire BRGM.

I.2.2.2. Configuration d'un forage en nappe captive :

La figure I.08 schématise les deux étapes pour la réalisation d'un forage en nappe captive, et occultant (dans cet exemple) une première nappe libre. Dans ce cas, les trois principaux objectifs sont :

- d'empêcher toute communication entre les eaux superficielles et les eaux souterraines,
- d'empêcher la mise en communication de la nappe libre avec la nappe captive,
- d'adapter les diamètres de forage et des tubages aux équipements de production (BRGM ,2003).

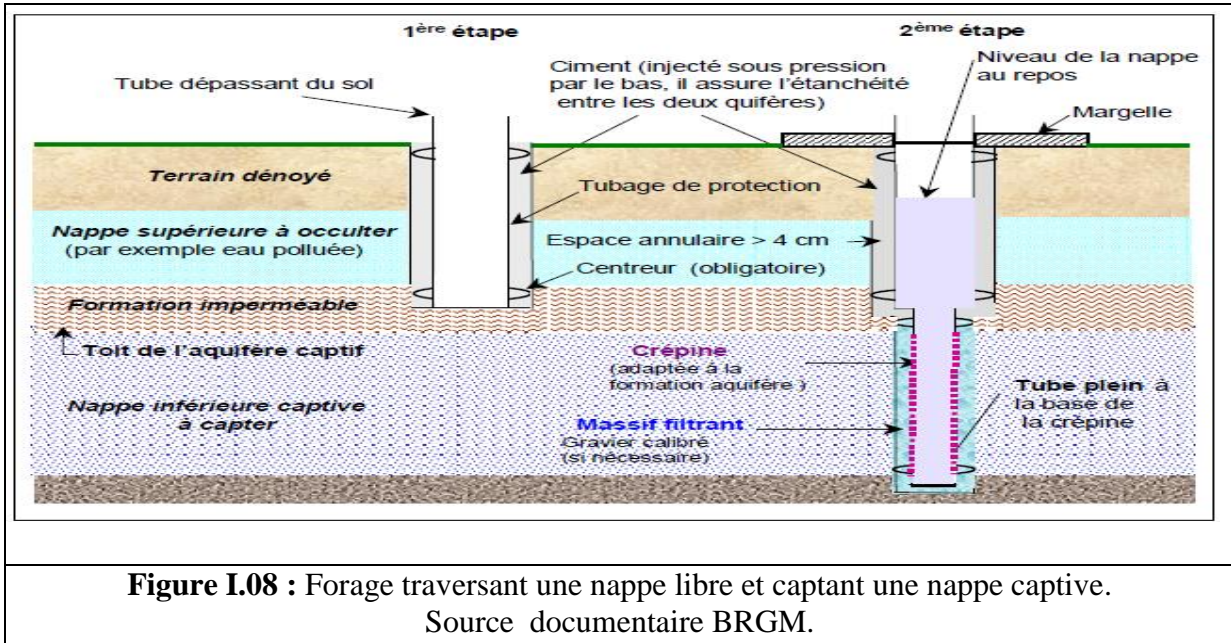


Figure I.08 : Forage traversant une nappe libre et captant une nappe captive.
Source documentaire BRGM.

I.2.3.L'équipement des forages d'eau :

L'équipement du forage d'exploitation d'eau potable constitue la dernière étape avant la mise en production de la ressource d'un gisement. Il est constitué par les éléments suivants :

I.2.3.1. Tubages :

Les tubages se caractérisent par leur diamètre, leur épaisseur, leur méthode de fabrication. Pour les tubages métalliques (tubes étirés ou soudés), leur technique d'assemblage qui peut s'effectuer par filetage, soudage, bride ou différents raccords particuliers. La sélection de ces assemblages doit permettre de limiter toute zone de rétention de fluide et de turbulence. Toute multiplication de matériaux différents (joints, soudures) est à éviter. (BRGM, 1995)

Le rôle du tubage est le soutènement de talus cylindrique du trou de forage contre la poussée de terre, l'éboulement et l'effondrement. (M. Metaiche, 2013).

Les tubes peuvent être en acier, en PVC (pour les puits de faible profondeur), et plus rarement en acier inoxydable (coût très élevé). Les fonctions principales du tubage sont de maintenir les parois du forage (éviter les éboulements), de délimiter les venues d'eau à exploiter et parfois de supporter la pompe immergée. Les caractéristiques du tubage sont fonction, d'une part, des débits d'exploitation espérés et, d'autre part, du choix de la pompe

immergée que l'on veut utiliser. Il est recommandé de laisser au moins un pouce (2,54 cm) de jeu entre le rayon du tube et celui de la pompe. Il faut aussi laisser un jeu d'un pouce entre le tube et la paroi nue du forage. Empiriquement, le diamètre de sortie de la pompe (en pouce) est de l'ordre de la moitié de la racine carrée du débit Q visé (en m^3/h). Le diamètre du tubage à prévoir est le diamètre de sortie de la pompe plus deux pouces (5 cm), le diamètre de foration étant encore supérieur de deux autres pouces (5 cm). (O.Banton, M.Bangoy, 1999).

I.2.3.2.Les Crépines :

La crépine constitue l'élément principal de l'équipement d'un ouvrage d'exploitation d'eau. Placée à la suite du tubage plein, face à une partie ou à la totalité de la formation aquifère. Elle est un tube perforé, servant comme filtre métallique entre le terrain et le forage, leur rôle dans le forage est le drainage de la nappe. Les crépines doivent :

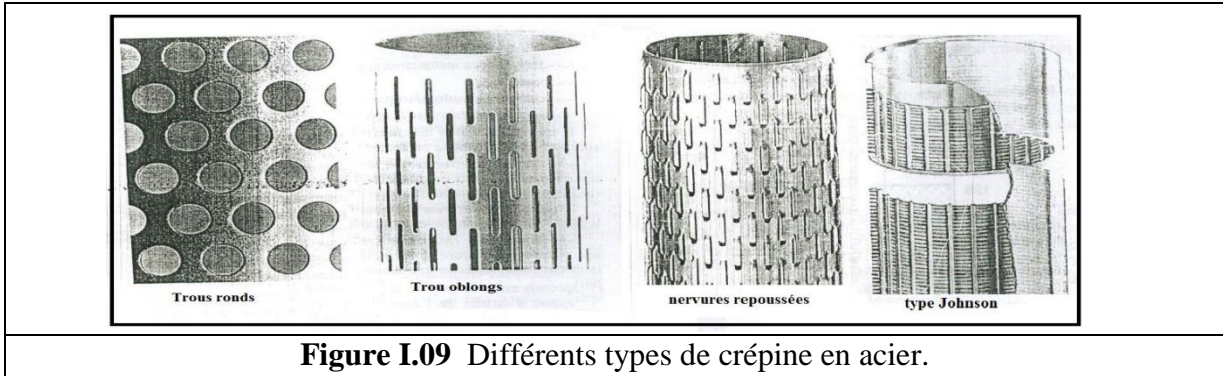
- Permettre la production maximale d'eau claire sans sable.
- Résister à la corrosion due à des eaux agressives.
- Résister à la pression d'écrasement exercée par la formation aquifère en cours d'exploitation.
- Avoir une long évité maximale.
- Induire des pertes de charge minimales.

Le rôle de la crépine est d'éviter l'entrée de sables et des éléments fins de l'aquifère à l'intérieur de la colonne de crépine afin d'être aspirés par la pompe, car ils constituent un grand risque pour cette dernière (corrosion, usure). (M.Metaiche, 2013).

I.2.3.2.1.Types de crépines :

Il existe plusieurs types de crépines industrielles en acier (figure I.09) :

- Crépines à trous ronds : utilisé en terrains durs, mais de faible densité de perforation ou de vide (10%).
- Crépine à trous oblongs : avec des fentes rectangulaires verticales, de largeur au moins égale à l'épaisseur de la tôle, longueur standard 3 cm, mais de faible densité de perforation (10 à 20%).
- Crépine à prussiennes, avec des perforations rectangulaires horizontales, formant auvent, de bonne résistance mécanique, mais de faible pourcentage de perforation.
- Crépine à nervures repoussées, types très fréquemment utilisé, réalisé à plat puis roulé et soudé, de bonne résistance mécanique du fait du faible enlèvement de métal, de pourcentage de vide variant de 3 à 27% selon les dimensions des ouvertures pratiquées.
- Crépine type Johnson, à ouverture horizontale continue sur toute la longueur de la crépine, obtenue par enroulement en hélice d'un « fil enveloppe profile » soudé sur des génératrices métallique verticales. Les avantages principaux de telle crépine sont :
 - La régularité et la précision des ouvertures.
 - Les faibles risques de colmatage.
 - Le coefficient d'ouverture le plus élevé par rapport aux autres crépines.



I.2.3.3. Massif Filtrant (gravier additionnel) :

Ce sont des matériaux meubles formés d'éléments calibrés (graviers, granulats), disposés dans l'espace annulaire entre la crépine et les parois de puits pour empêcher l'érosion souterraine et prévenir le colmatage et la réduction conséquente de l'efficacité de forage. Le gravier filtre doit être assez uniforme, calibré, propre, rond et siliceux de préférence. Il ne doit pas être calcaire, ni concassé.

Le rôle du gravier additionnel est d'augmenter les débits d'exploitation, de diminuer les vitesses d'écoulement, et d'éviter le risque d'érosion en évitant l'entrée des sables fins. (M. Metaiche, 2013).

Par ailleurs, il faut savoir qu'un gravier additionnel de granulométrie surdimensionnée dans une formation sableuse fine, peut provoquer un ensablement de l'ouvrage. Par contre, un massif filtrant de granulométrie trop fine peut conduire à une exploitation partielle de la nappe et rendre difficile l'élimination de la boue de forage.

Massif filtrant est un appareil composé par un matériau meuble formé d'éléments calibrés (graviers, granulats), disposés dans l'espace annulaire compris entre le tubage et les parois d'un puits pour empêcher l'érosion souterraine et prévenir le colmatage et la réduction conséquente de l'efficacité du puits. (G. Castany, J. Margat, 1977).

I.2.3.4. Ciment :

La cimentation est l'opération qui consiste à mettre en place par simple déplacement, de tubage, en une ou plusieurs fois. La cimentation du tubage est destinée à atteindre les objectifs suivants :

- ancrer les tubages dans le terrain ou les tubes provisoires,
- empêcher toute migration de fluide d'une formation dans une autre et surtout celles productrices qui constituent l'objectif de ce forage,
- rendre l'espace annulaire étanche et empêcher la pollution par les eaux de surface,
- protéger le tubage de l'action corrosive de certains fluides ou terrain.

Pour atteindre ces objectifs, la "gaine de ciment" mise en place entre le terrain et le tubage doit être : continue, homogène, imperméable et adhérente aux parois du forage et au tubage. (BRGM, 1995).

I.2.4.Mise en place de l'équipement d'un forage (crépines et massif de gravier) :

L'équipement du forage d'exploitation d'eau potable constitue la dernière étape avant la mise en production de la ressource d'un gisement. Cette étape est aussi essentielle que celle qui a permis d'identifier le niveau aquifère à capter puisqu'il s'agit de garantir la qualité de l'eau potable exploitée au cours du temps. L'équipement comporte toujours une colonne d'exploitation maintenant le terrain dans la partie supérieure non aquifère proprement dit.

La base du tubage est un point très vulnérable, en contact avec l'aquifère. Une isolation parfaite entre les morts-terrains, les aquifères supérieurs et le réservoir est absolument nécessaire. Lors du reforgé des bouchons, du sabot de cimentation et du ciment résiduel, puis de l'alésage ou des sur alésages du réservoir, la base du tubage va subir des chocs et des vibrations, qui auront tendance à endommager la cimentation du sabot. Les eaux artésiennes pourront provoquer des effets de dilution. Avant de descendre la colonne de captage, les parois du trou seront bien contrôlées, raclées et énergiquement brossées pour détruire les concrétions de boue au droit des réservoirs (cake).

La colonne de captage sera constituée :

- d'un sabot de pied fermé, de préférence conique, pour une meilleure pénétration dans les réductions de diamètres ;
- d'un tube plein de décantation qui a pour avantage d'éviter la remise en circulation des dépôts ;
- d'éléments crépines dont l'ouverture est calculée en fonction de la granulométrie des terrains meubles ;
- d'un tube d'extension ou de croisement, suffisamment long pour permettre une réserve de gravier suffisante, avec incorporation d'un élément crépine court témoin de remplissage au sommet.

Tous les éléments seront garnis de centreurs, car si la colonne est excentrée sur un côté du trou, il n'y aura pas de gravier sur un côté et les sables pourront pénétrer dans les crépines. Les centreurs posés autour des tubes de croisement seront de type diélectrique.

Le massif de gravier peut être mis en place en circulation inverse ou avec un cross-over tool, et dans tous les cas avec un tube plongeur (wash-pipe) dans la base intérieure des crépines. Ceci oblige le passage de la boue (qui entraîne le gravier) à travers les crépines et qui commence par la base, d'où un remplissage de gravier initialement par le fond du puits puis au fur et à mesure vers le haut. Lorsque le gravier atteint l'extrémité supérieure de la crépine témoin la circulation est interrompue et la pression d'injection augmente brusquement. Le volume de gravier mis en place est égal au volume de l'annulaire crépine-trou sur la hauteur des crépines. L'opération de mise en place du gravier ne peut être refaite parce que la traction nécessaire pour retirer les crépines de la gangue de gravier est très élevée (une hauteur de 4 m de sable autour d'un tube de 7 pouces correspond à une traction de 40 t). Toutes les précautions devront être prises pour que le gravillonnage soit réussi du

premier coup. En particulier, il faudra déterminer la granulométrie du sable de la formation pour choisir la granulométrie du sable du massif et l'ouverture des crépines.

Après la survenance de l'à-coup de pression indiquant la fin de la mise en place du massif de gravier le tourne à gauche sera dévissée et légèrement remonté. Le tube laveur, branché en circulation directe, permettra de mettre le puits en eau claire, de le laver et d'injecter des solutions de traitement.

Ultérieurement, après le développement, les essais, et ajouts de gravier, l'espace annulaire entre le sommet la porte crépine et la colonne de tubages sera fermé par un obturateur retirable. (B.Sourisseau, J-R.Daum, G.Loungin, 1998).



Figure I.10 : Aspect des crépines et massif filtrant en place.

I.2.5.Équipement d'exhaure dans le forage :

Il n'est pas question d'aborder l'ensemble des équipements d'une station de pompage mais seulement quelques aspects directement liés à l'ouvrage comme :

La compatibilité avec le fluide et les matériels introduits dans le forage (pompe immergée, colonne d'exhaure, sonde de niveau, alarme niveau haut niveau bas, câble électrique, câble de soutien de la pompe ...).

Les caractéristiques et la position de la pompe immergée dans la colonne de captage qui doit répondre aux caractéristiques géométriques hydrauliques mais aussi hydrochimiques de cet ouvrage.

Les équipements d'anti-retour et disconnexion qui sont la seule garantie de protection contre la rétropollution des ressources.

Les précautions de mise en œuvre de tous ces matériels (nettoyage, stérilisation, travaux en environnement propre).

Les spécifications de la tête de puits, pièce d'interface ressource / atmosphère qui cumule les fonctions de fermeture de l'ouvrage, suspension des équipements de refoulement et de gestion de l'annulaire du forage.

C'est aussi l'interface entre le point d'émergence et les équipements de l'exploitation de surface qui doivent aussi faire l'objet du même souci de qualité.(BRGM,1995).

I.3. Eaux souterraines :

L'eau souterraine constitue un milieu continu dans le réservoir dont seule une fraction, l'eau gravitaire, est mobile dans l'aquifère.

I.3.1. Types d'eau souterraine :

Il convient de distinguer, pour définir les caractéristiques hydrogéologiques des réservoirs, deux types d'eau souterraine : l'eau gravitaire et l'eau de rétention.

A. L'eau gravitaire :

L'eau gravitaire est la fraction de l'eau souterraine libérée par l'action de la force de gravité. C'est l'eau mobilisable. Elle seule circule dans les aquifères, sous l'action des gradients et alimente les ouvrages de captage et les sources. Le volume d'eau gravitaire libéré est fonction du temps d'égouttage et de la granulométrie. (J.BODELLE, J.MARGAT. 1980).

B. L'eau de rétention :

L'eau de rétention est la fraction de l'eau souterraine, maintenue dans les vides à la surface des grains ou des parois des microfissures, par des forces supérieures à celles de la gravité. Elle n'est donc pas mobilisable. Attirée fortement à la surface du solide, elle fait corps avec lui et appartient physiquement et mécaniquement à la même phase de l'aquifère, réservoir/eau de rétention. (J.BODELLE, J.MARGAT. 1980).

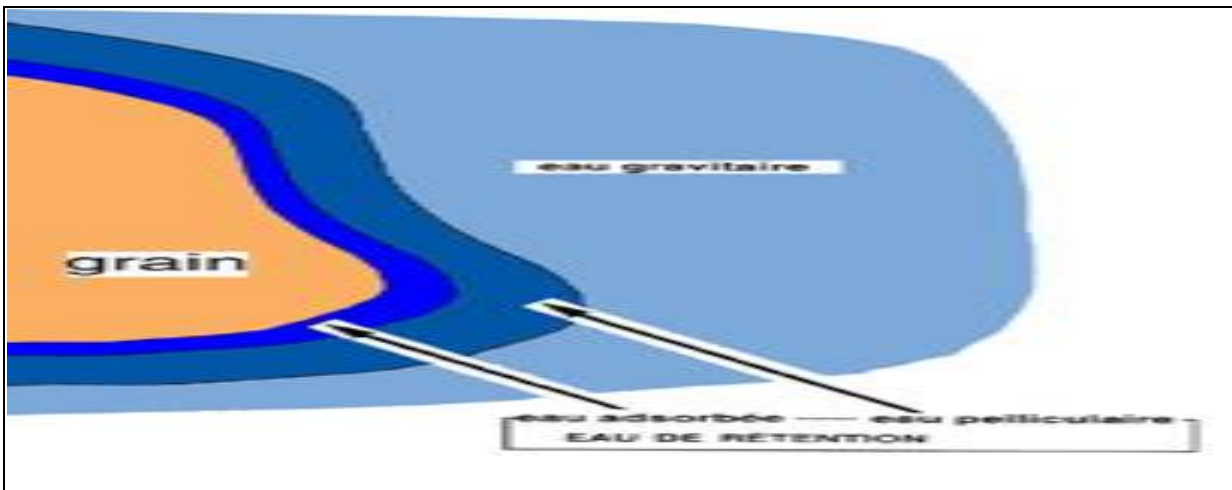


Figure I.11 Différents types d'eau souterraine (source INPE).

Le phénomène de rétention de l'eau, à la surface des grains, est la conséquence de la structure moléculaire particulière de l'eau. La molécule d'eau est une très petite molécule angulaire. Elle est constituée de 2 atomes d'hydrogènes et d'un atome d'oxygène chargé négativement. Le défaut de 2 électrons de l'atome d'oxygène la dote d'un moment dipolaire élevé. Ainsi polarisée, elle se comporte comme un minuscule aimant permanent ou dipôle. Au contact des molécules polarisées se développent ainsi des forces d'attraction moléculaire de plusieurs dizaines de milliers de fois la force de gravité.

La limite de séparation des 2 phases eau/grain, est le lieu de champs de force. Ceux-ci attirent, en les orientant perpendiculairement à la surface, les dipôles qui sont solidement fixés. La molécule est adsorbée.

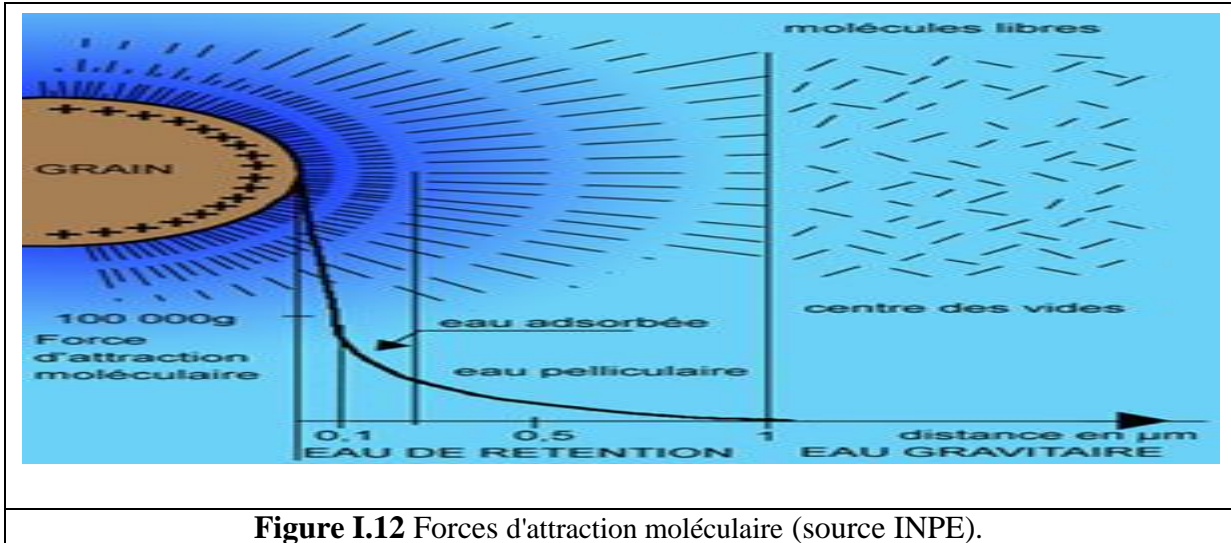


Figure I.12 Forces d'attraction moléculaire (source INPE).

Les forces d'attraction moléculaire décroissent, très rapidement, de la surface des grains vers le centre des vides. Les liaisons deviennent de plus en plus lâches et l'eau peut être libérée du réservoir par des forces de plus en plus faibles. Les molécules devenues libres, à une distance très faible de la surface du grain (1 à 2 microns) peuvent être déplacées par la force de gravité. Cet état n'étant pas constant, cette conception explique, en partie, l'accroissement en fonction du temps, du volume d'eau gravitaire obtenue par égouttage.

On peut ainsi séparer 2 phases dans la classe de l'eau de rétention :

- L'eau adsorbée constitue un film continu, mince pellicule d'une épaisseur de l'ordre du dixième de micron, soit l'empilement de quelques dizaines de molécules. En pourcentage du volume total, elle augmente en fonction de la granulométrie : 2 à 5% dans les sables gros, 10 à 15 dans les sables fins et 40 à 50 dans les argiles.
- L'eau pelliculaire représente une pellicule de l'épaisseur de l'ordre du micron. Elle peut se déplacer à la surface des grains sous l'action de l'attraction des molécules d'eau voisines. (J.BODELLE, J.MARGAT. 1980).

I.3.2.Caractéristiques des eaux souterraines :

Les eaux souterraines circulent dans les pores du massif souterrain constitué de grains solides. La qualité des eaux souterraines est affectée par la nature des formations géologiques où elles circulent. Elles peuvent être incrustantes (formation calcaire) où agressive (formation gypseuse) ce qui va influencer directement sur l'ouvrage de son exploitation.

I.3.2.1.Propriétés physiques de l'eau :

Certaines propriétés physiques de l'eau jouent un rôle important pour son existence et sa dynamique dans les matériaux géologiques. L'eau se trouve dans la nature sous les trois formes solide, liquide et gazeuse. A la pression atmosphérique (à l'altitude zéro), les changements d'état de l'eau pure se font respectivement aux températures de 0 et 100 °C. Entre ces deux températures limitées, les propriétés physiques de l'eau liquide varient,

parfois de façon importante. Cette dépendance à la température, ainsi pression, affecte le comportement de l'eau dans les matériaux. (O.Banton, M.Bangoy, 1999).

Tableau I.01 : Valeurs de propriétés physiques de l'eau douce pour différentes températures (à la pression atmosphérique). (O.Banton, M.Bangoy, 1999).

T °C	P	μ	Pv	T _s	β_p	β_t	λ	c
0	999,8	1,792	0,61	75,64	0,5098	-68	0,134	1,0087
10	999,7	1,308	1,23	74,22	0,4789	88	0,139	1,0018
20	998,2	1,005	2,34	72,75	0,4591	207	0,143	0,9986
30	995,6	0,801	4,24	71,18	0,4475	303	0,147	0,9975
40	992,2	0,656	7,38	69,56	0,4422	385	0,150	0,9976
50	988,1	0,549	12,33	67,91	0,4417	458	0,153	0,9993
60	983,2	0,469	19,92	66,18	0,4450	523	0,156	1,0008
70	977,8	0,406	31,16	64,42	0,4515	584	0,158	1,0024
80	971,8	0,357	47,34	62,61	0,4610	641	0,160	1,0043
90	965,3	0,317	70,10	60,75	0,4734	696	0,161	1,0043
100	958,4	0,284	101,33	58,85	0,4890	750	0,162	1,0065

p : masse volumique (kg/m³), μ : viscosité dynamique (10⁻³ N. s/m²).
 p_v: pression de vapeur (kPa). T_s : tension de surface à l'air (10⁻³ Pa.m).
 β_p : compressibilité (10⁻⁹ m²/N). β_t : coefficient d'expansion thermique (10⁻⁶ °C⁻¹).
 λ : conductivité thermique (10⁻³ kcal/sec/m/°C). c : chaleur spécifique (kcal/kg/°C).

I.3.2.2. Hydrogéochimie des eaux souterraine :

C'est la connaissance des caractéristiques chimiques (physico-chimiques) des eaux souterraines, des processus de leur acquisition et des lois qui régissent les échanges entre l'eau, le sol et le sous-sol.

I.3.2.2.1. Caractéristiques chimiques des eaux souterraines :

L'eau souterraine n'est pas pure puisqu'elle contient toujours des substances (gaz, liquides ou solides) dont les concentrations et la stabilité dépendent de paramètres tels que le pH du milieu, la pression partielle des gaz en contact avec les eaux, la nature des substances minérales, organiques ou inorganiques dissoutes, la texture des sols, etc. On tente alors de comprendre les phénomènes qui ont cours dans les eaux naturelles par la modélisation théorique de ceux-ci. En chimie, les phénomènes observés sont basés soit sur l'approche cinétique des équilibres chimiques dont les eaux naturelles sont le siège, soit sur l'approche des équilibres thermodynamiques. (O.Banton, M.Bangoy, 1999).

I.3.2.2.2. Faciès chimiques des ions majeurs des eaux souterraines :

La chimie des eaux souterraines est dominée par la présence de certains ions, plus abondants que d'autres dans les systèmes hydrogéologiques, ou plus facilement mis en solution. Ces ions sont ainsi appelés des ions majeurs. Ce sont, dans un ordre non relié à leur abondance relative possible : le calcium (Ca²⁺) le magnésium (Mg²⁺), le potassium (K⁺) et le sodium (Na⁺), pour les cations (de charge positive), ainsi que le bicarbonate (HCO₃⁻), le carbonate (CO₃²⁻), le chlorure (Cl⁻) et le sulfate (SO₄²⁻), pour les anions (de charge négative). La silice sous diverses formes est également fréquemment considérée comme un élément

majeur et ainsi regroupé avec les ions majeurs. A côté de ces éléments majeurs, certains autres ions qualifiés d'éléments mineurs peuvent aussi être retrouvés dans les eaux mais en fréquence et en abondance moindre : le bore (B), le fer (Fe^{2+} , Fe^{3+}), le fluor (F), le manganèse (Mn^{2+}), le nitrate (NO_3^-), le strontium (Sr^{2+}). Tous les autres ions ou éléments sont qualifiés d'éléments traces, apparaissant généralement en concentration très faible. Etonnamment, l'aluminium si abondant dans les matériaux géologiques (le plus abondant après le silicium) est peu retrouvé dans les eaux souterraines et fait partie des éléments traces. En effet, l'ion échangeable Al^{3+} n'existe qu'aux pH inférieurs à 5 alors que la plupart des eaux naturelles ont des pH compris entre 7,5 et 8,5. Parmi les éléments traces, certains métaux peuvent se retrouver à des concentrations faibles mais pouvant présenter une toxicité et des risques pour la santé humaine. (O.Banton, M.Bangoy, 1999).

I.3.2.2.3. Propriétés chimiques des eaux souterraines :

1-Acidité : dépend sur la concentration de les ions H^+ ou H_3O^+ et elle est évaluée par le paramètre PH déterminé par la formule suivante :

$$\text{PH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$$

Avec, $[\text{H}_3\text{O}^+]$: est concentration de H_3O^+ .

2-Salinité : c'est la teneur en sels, en matières minérales dissoutes dans une eau, exprimée en concentration par unité de volume ou de poids de dimension M L^{-3} . (G. Castany, J. Margat, 1977).

3-Dureté : est propriété d'une eau, causée principalement par sa teneur en ions « terreux », Ca et Mg, de provoquer un résidu insoluble au contact d'une liqueur de savon et un dépôt de carbonate sous l'effet de l'ébullition. Elle est exprimée quantitativement par le degré, ou Titre hydrotimétrique. (G. Castany, J. Margat, 1977).

I.3.2.3. Différent types d'eau selon leurs qualités :

En général, la qualité des eaux souterraines dépend directement de leurs propriétés physico-chimiques. On cite quelques types d'eau souterraine :

1-Eau agressive : est eau naturellement acide, principalement par sa teneur en anhydride carbonique, pouvant exercer une action corrosive sur des roches ou des matériaux. (Imbeaux, 1930).

2-Eau douce : est eau contenant une faible quantité de matières dissoutes, exempte de goût dû à des sels minéraux, par opposition à une eau salée.

3-Eau incrustante : est eau saturée en sels dissous, généralement en bicarbonate, dont la précipitation est facilement provoquée par dépassement du point de saturation, déterminant un dépôt (incrustation).

4-Eau salée : est eau contenant une quantité sensible, surtout du point de vue de la potabilité, de sels dissous, plus particulièrement de chlorure de sodium par opposition à une eau douce. Sa concentration minimale en matières dissoutes peut être fixée conventionnellement : en général à 1 000 ppm. Les eaux salées comprennent les eaux saumâtres, les eaux salines, les eaux sursalées. (Perrault, 1674).

I.4.Hydrodynamique de l'eau dans les matériaux (aquifère, massif) :

Dans tous les milieux géologiques, les propriétés physiques et hydrodynamiques des matériaux varient de façon plus ou moins importante dans l'espace. Ainsi, même à l'intérieur d'un matériau géologique homogène, les différentes propriétés présentent une variation selon l'endroit de leur observation, selon la direction ou le plan de leur mesure et selon la dimension de l'échantillon physique sur lequel est réalisée cette mesure. L'importance de cette variation dépend de plusieurs phénomènes attribuables à différentes causes dont les principales sont l'hétérogénéité du matériau et l'anisotropie. (O.Banton, M.Bangoy, 1999).

I.4.1.Paramètres hydrogéologiques des matériaux :

La présence de l'eau dans les matériaux constituant le sol et le sous-sol est une réalité tangible, observable et mesurable que ce soit à la surface du sol, dans les premières couches de celui ou plus profondément, l'eau est presque toujours présente, mais dans des proportions qui varient selon le lieu et le moment de l'observation. Le contenu (ou la teneur) en eau d'un matériau n'est donc pas une propriété intrinsèque de ce dernier, mais une variable du temps et de l'espace. Néanmoins, le contenu en eau susceptible d'être observé en un point donné du sol est en partie relié à certaines propriétés et caractéristiques du matériau constituant ce sol. (O.Banton, M.Bangoy, 1999).

1. La porosité :

La porosité totale d'un matériau est le rapport du volume des pores au volume total occupé par le matériau sec. Elle est exprimée comme une fraction de volume (généralement entre 0 et 1) ou en pourcentage (généralement entre 0 et 100 %). Dans le cas des matériaux gonflants (argile, tourbe), la porosité prend parfois des valeurs supérieures à 1 (ou à 100 %). (O.Banton, M.Bangoy, 1999).

$$\phi = V_{\text{vides}} / V_{\text{total}} \times 100\%.$$

Où :

V_{total} est le volume total de la roche et V_{vide} le volume des vides qu'elle contient.

On définit aussi la porosité efficace, ϕ_e , qui correspond à la porosité connectée. La porosité dépend principalement de :

- la forme des grains : sphériques, allongés, angulaires ;
- la distribution des tailles ;
- l'intensité de la cimentation de la roche. (F.Renard. 2007).

2. Perméabilité (k) :

La perméabilité est la capacité d'une roche à transmettre un fluide. Les facteurs intervenant sont la taille des grains, la porosité, la nature du fluide transmis et son gradient de pression. Tandis que la porosité décrit les espaces dans lesquels le fluide peut se déplacer, la perméabilité (k) et la conductivité hydraulique (K) décrivent la facilité qu'a un fluide de se déplacer dans une formation. La porosité et la perméabilité ne sont pas reliées directement. Les argiles peuvent avoir une porosité élevée (30 à 80%) mais des perméabilités très faibles tandis qu'un sable a une porosité plus faible (30 à 40%) mais une perméabilité forte. L'unité de perméabilité est le m^2 , on utilise cependant une valeur plus faible, le Darcy

(1 Darcy = 10^{-12} m²). La valeur de la perméabilité ne dépend que de la roche et pas du fluide.

La perméabilité du sol est un facteur important en ce qui concerne les infiltrations. Si l'eau ne peut s'infiltrer, son accumulation à la surface peut provoquer des inondations. C'est ce qui arrive dans les régions froides à la fonte des neiges. Le sol est encore gelé et possède une perméabilité faible. Toute l'eau de fonte des neiges et les pluies ruissellent donc uniquement à la surface et augmentent la probabilité des crues et inondations. (F.Renard. 2007).

2.1. Loi de Darcy et ses domaines d'application :

L'expérience de base de l'hydrogéologie des milieux continus a été réalisée par Darcy en 1856. Dans un cylindre vertical de section A, une hauteur Δh d'eau percole à travers une hauteur L de sable. Darcy observe qu'il existe une proportionnalité entre le débit Q au qui traverse le sable et la valeur de $\Delta h/L$. On appelle perte de charge ou gradient hydraulique i ce rapport, et coefficient de filtration K le facteur de proportionnalité entre perte de charge et débit de percolation. (E.Gilli, C.Mangan, J.Mudry, 2004).

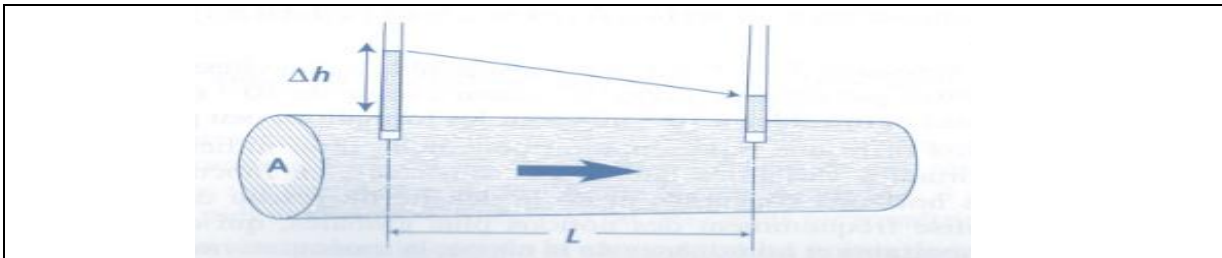


Figure I.13 Expérience de Darcy appliquée à l'écoulement horizontal d'une nappe.
(E.Gilli, C.Mangan, J.Mudry, 2004).

Cette expérience est transposable à l'écoulement horizontal d'une nappe

Formule de Darcy : $Q = K.A. \Delta h/L$

Si l'on divise les deux membres par A, on obtient : $Q/A = K.i$

Tel que :

$Q/A = V$ est appelée vitesse de filtration.

2.2. Limites de la loi de Darcy :

En général, la loi de Darcy considère que l'eau se propage dans un milieu homogène et continu, et que la structure des particules solides est microscopique par rapport au champ d'observation. La loi de Darcy ne s'applique donc pas à l'écoulement en milieu fissuré. C'est à dire lorsque l'écoulement est turbulent. (F.Renard. 2007).

3. Conductivité hydraulique (K) :

La conductivité hydraulique, K, est reliée de manière étroite à la perméabilité. Contrairement à la perméabilité qui n'est fonction que de la roche, la conductivité hydraulique dépend à la fois de la roche et du fluide qui y circule. L'unité de la conductivité hydraulique est le m/s.

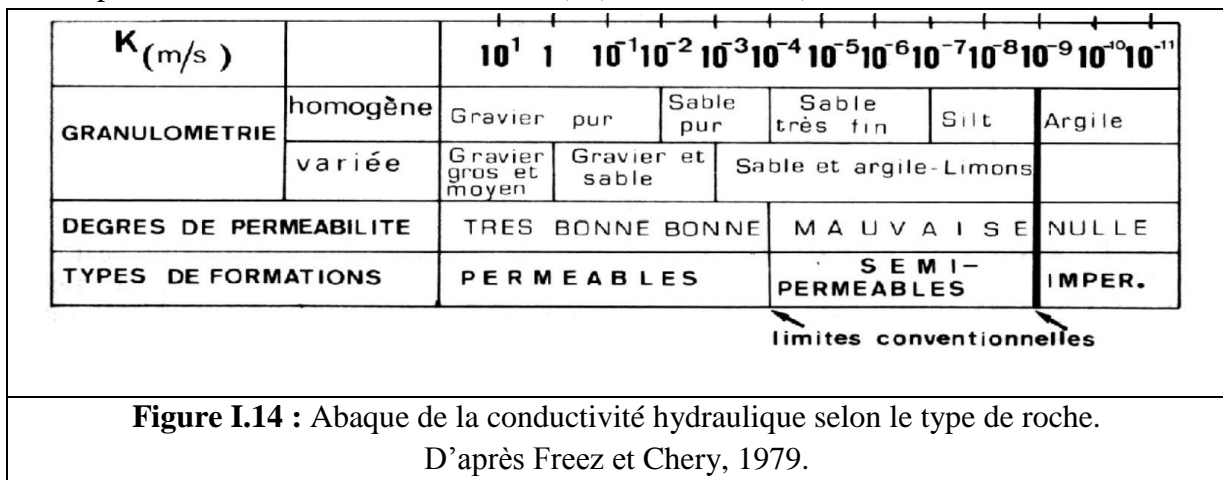
$$K = k \rho f g / \mu$$

Chapitre I : Le forage d'eau et les nappes souterraine

- μ = viscosité dynamique du fluide (1000 kg/m.s = Pa.s pour l'eau).
- ρ_f = densité du fluide (1000 kg/m³ pour l'eau pure).
- g = constante de la gravité (9.81 m/s²).
- k = perméabilité intrinsèque (m²) ou Darcy (1 Darcy = 10⁻¹² m²).

L'influence sur la conductivité hydraulique :

- Un fluide plus visqueux diminue la conductivité hydraulique.
- Un fluide plus dense (plus lourd) augmente la conductivité hydraulique.
- Une roche plus perméable possède une conductivité hydraulique plus élevée.
- Des fluides avec des compositions différentes (eau, eau salée, hydrocarbures) peuvent induire des conductivités hydrauliques différentes dans une même roche.
- Selon le type de roche (peu perméable ou très perméable) la conductivité hydraulique peut varier entre 10⁻¹⁴ m/s et 10¹ m/s). (F.Renard. 2007).



Voici quelques exemples de valeurs de la porosité associée à celles du coefficient de conductivité hydraulique qui représente sur le tableau suivant :

Tableau I.02 : valeurs de porosité et de perméabilité de certains matériaux.
(F.Renard. 2007).

Sol	Porosité	Perméabilité (m/s)
Sable grossier	27%	3x10 ⁻³
Sable moyen	32%	5x10 ⁻⁴
Sable fin	34%	1x10 ⁻⁴
Silt (=sable très fin)	40%	2x10 ⁻⁶
Argile	50%	≤ 10 ⁻⁸

I.4.2. Caractéristiques hydrodynamiques des milieux poreux :

La caractéristique hydrodynamique majeure des milieux poreux est que, leur porosité interconnectée étant une propriété sédimentologie, l'écoulement se fait dans toute la section de l'aquifère, avec des vitesses relativement homogènes et faibles, du fait de la grande section d'écoulement. La conséquence en termes d'exploitation est la probabilité élevée d'obtenir les mêmes caractéristiques hydrodynamiques à une certaine distance d'un ouvrage. Cependant, cette remarque ne peut être appliquée à un aquifère deltaïque, dans lequel l'écoulement est

hautement chenalisé, et donc où la répartition des vitesses sera très hétérogène : très rapides dans le chenal graveleux, quasi-nulles dans ses épontes limono-argileuses.

(E.Gilli, C.Mangan, J.Mudry, 2004).

I.4.3. Le Régime d'écoulement des eaux souterraines :

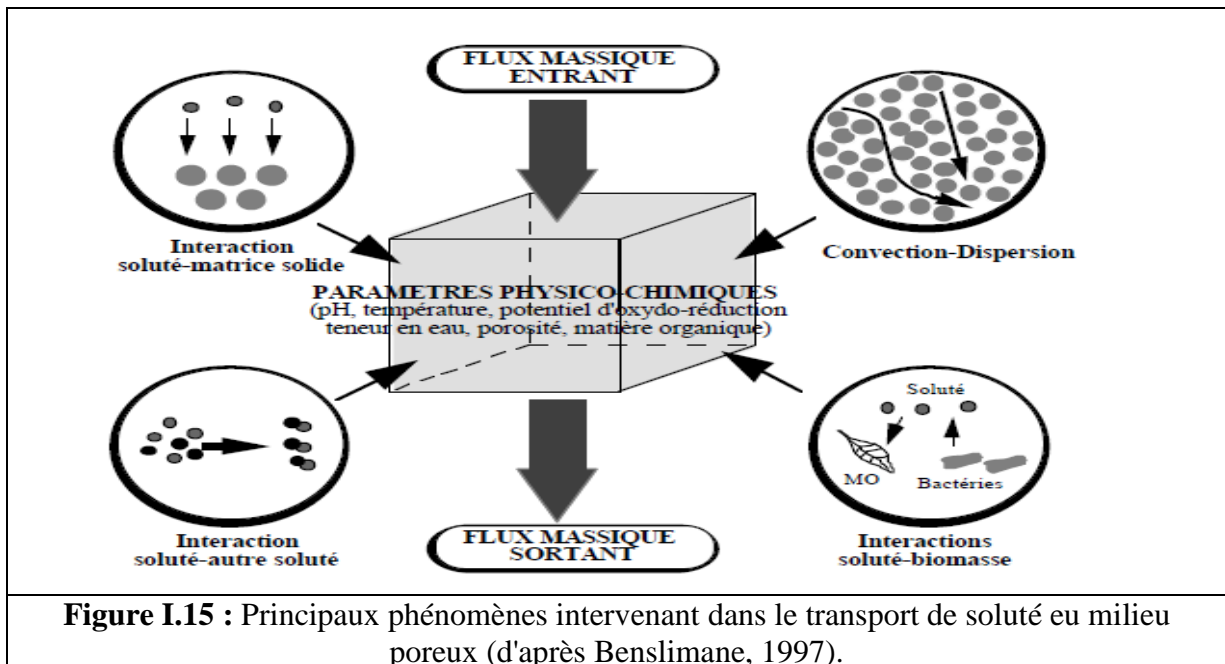
Sont Ensemble des modalités du mouvement et du renouvellement (alimentation, débit) des eaux souterraines déterminées par les conditions et les facteurs qui les gouvernent. Régime permanent ou transitoire, régime influencé ou non influencé, régime laminaire ou turbulent, régime karstique. (Daubrée, 1887).

I.4.4. Mécanisme de transport :

Le transport en milieu poreux est un phénomène difficile à appréhender car il fait appel aux domaines de la physique, de la chimie, de la biologie et de l'hydrodynamique. Il faudra en effet prendre en compte :

- la nature du produit transporté (son caractère miscible ou non. sa solubilité).
- la nature du sol (texture, structure, richesse eu matière organique).
- hydrodynamique u site (position et fluctuation de la nappe, zone saturée, non samrée).
- activité biologique.
- l'activité anthropique (pompage, drainage, barrage,...).

La figure I.15 représente les modes de transport dans un écoulement souterrain.



Les éléments transportés par l'eau peuvent être :

- Minéraux (radioactifs ou non) ;
- Organiques ;

Ces éléments en solutions peuvent être sous forme de sels solubles (éventuellement partiellement ionisés), d'agrégats de molécules et/ou d'ions, de colloïdes.

I.5. Variables et paramètres régissant les écoulements autour d'un forage d'eau :

L'eau souterraine ne se déplace que s'il existe une différence de pression (ou un gradient hydraulique non nul) entre deux points et si la porosité de la roche est suffisamment bien connectée. La valeur du gradient hydraulique détermine à quelle vitesse l'eau circule d'un point à un autre. (F. Renard, 2007).

Le milieu autour du forage d'eau est un milieu poreux (gravir additionnel) donc la variation d'écoulement dépendra du potentiel hydraulique autour du forage et de la variation des paramètres du milieu poreux dont on cite :

I.5.1. Charge hydraulique :

Dans un aquifère, que la nappe soit à surface libre ou captive, la charge hydraulique correspond à l'altitude à laquelle l'eau s'élève dans un piézomètre (Figure I.16). Pour une nappe à surface libre, la charge hydraulique correspond donc à l'altitude de la surface libre. Il suffit de mesurer la profondeur de ce niveau et de connaître la cote du repère de mesure (sol, haut du tubage,...) par rapport à un plan de référence (par exemple le 0 NGF) pour obtenir la charge H :

$$H = Z_{niv} = Z_{sol} - P_{niv}$$

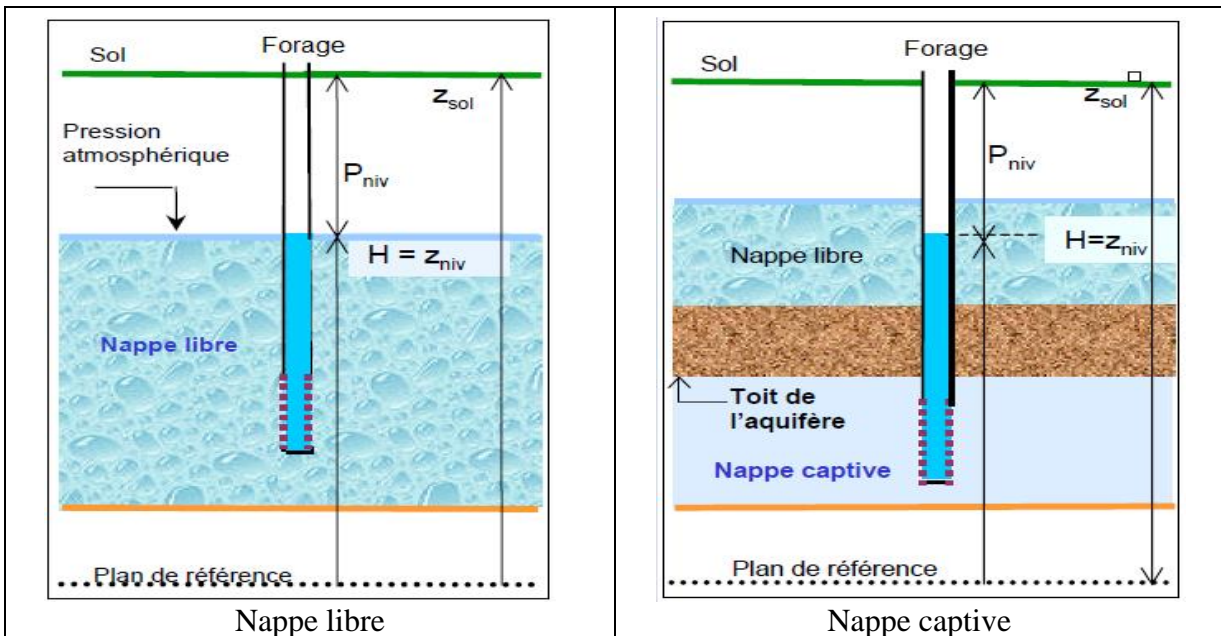


Figure I.16 : Charge hydraulique : cas d'une nappe libre et d'une nappe captive
Source (documentaire BRGM)

I.5.2. Gradient hydraulique :

Etant donnés 2 points (forages) distants de L sur une même ligne de courant, c'est la différence de charge hydraulique entre ces deux points (forages) divisée par longueur qui les séparent L (Figure I.17).

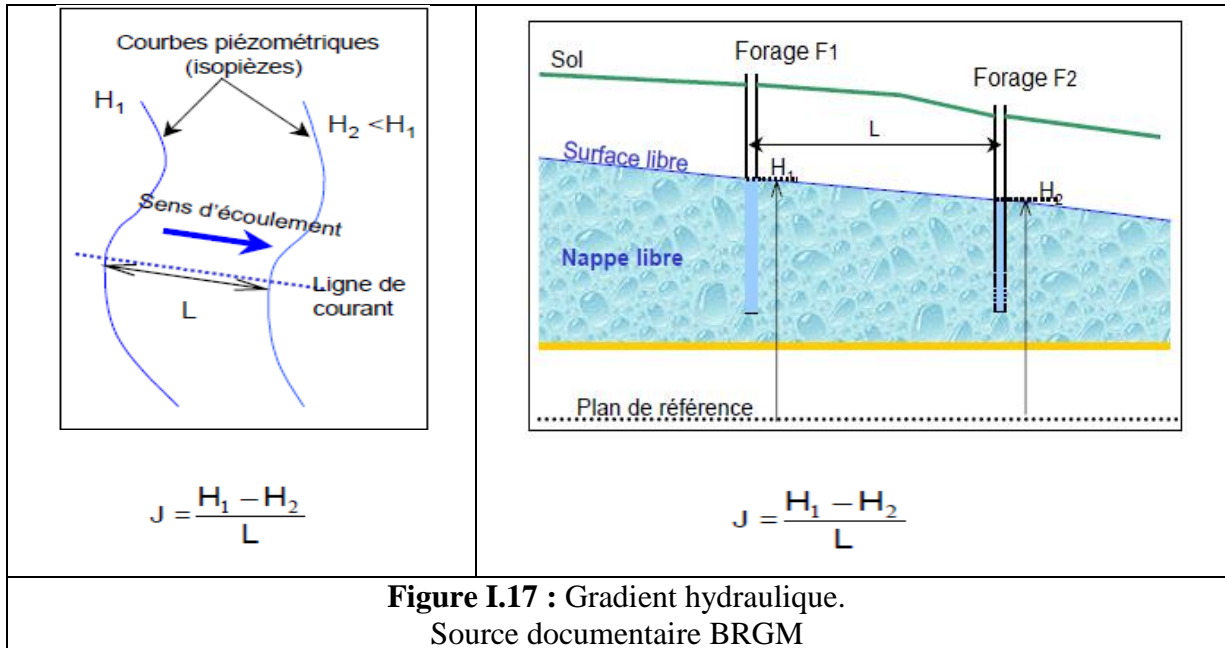


Figure I.17 : Gradient hydraulique.
Source documentaire BRGM

I.5.3.Perméabilité et transmissivite :

A) La perméabilité : est le paramètre qui caractérise et quantifie, à l'échelle macroscopique, l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide. La perméabilité s'exprime en m/s. Le tableau ci-dessous fournit des ordres de grandeur de la perméabilité.

Tableau I.03 : Perméabilités de certaines formations
D'après (J.J.Collin - 2004. BRGM).

Valeur de la Perméabilité	Classification hydrogéologique	Valeur de l'aquifère	Exemple de roche
10^{-2} à 10^{-4} m/s	perméable	très bon à bon	Sables et Graviers
10^{-5} m/s	assez perméable	assez bon	Calcaires gréseux
10^{-6} à 10^{-7} m/s	peu perméable	médiocre à mauvais	Limons, Marnes
égale ou inférieure à 10^{-8} m/s	très peu perméable	non aquifère	Argiles

La perméabilité d'une roche est grossièrement proportionnelle à la taille et à la fonction de distribution des grains qui la composent.

B) La transmissivité : est le paramètre qui détermine le débit d'eau s'écoulant 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.

I.5.4. Notion du rabattement :

C'est diminution de la charge hydraulique déterminée en un point donné sous l'effet d'un pompage d'eau, traduite en pratique par l'abaissement du niveau piézométrique par rapport au niveau naturel. Sa signification est liée au débit prélevé, à la distance du point de prélèvement et en régime transitoire, au temps écoulé depuis le début du prélèvement. Dimension : L, Symbole : S, Le rabattement observé dans un puits réel en pompage est la somme de la perte de charge dans l'aquifère et des pertes de charges dues au puits. (Gélis, 1956).

Les schémas de la figure I.18 illustrent les relations entre perméabilité, rabattement et débit d'exploitation des forages.

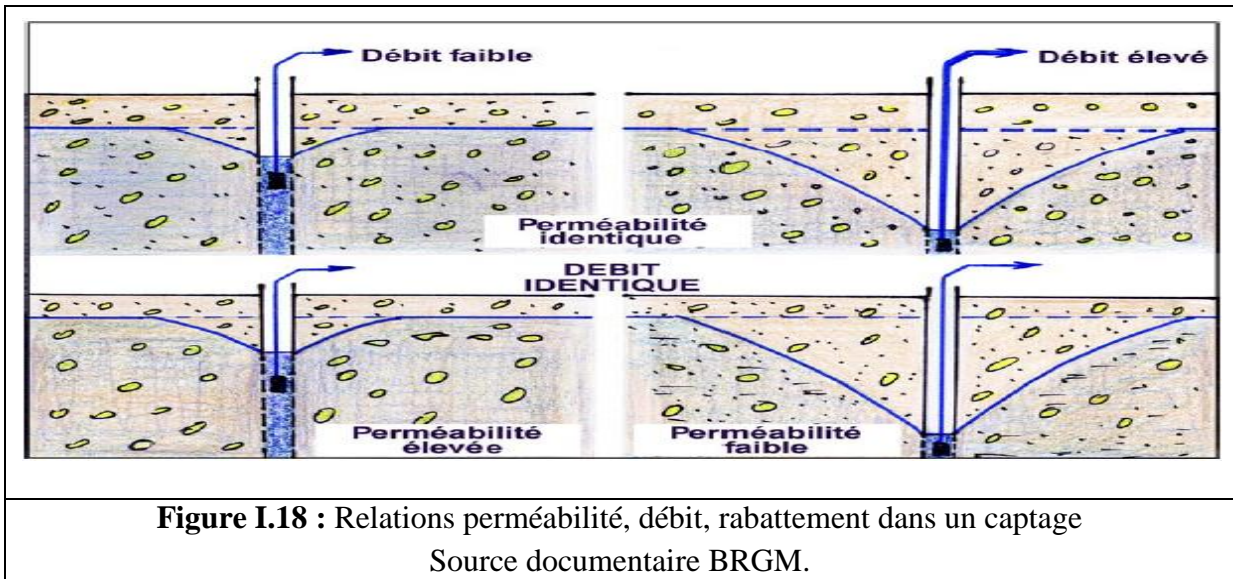


Figure I.18 : Relations perméabilité, débit, rabattement dans un captage
Source documentaire BRGM.

I.5.4. Autres paramètres liés à l'ouvrage (forage) :

1. Vitesse critique : Valeur de vitesse réelle de l'eau en mouvement dans un milieu perméable au-dessus de laquelle les pertes de charge sont proportionnelles à une puissance n de la vitesse (n étant une constante liée aux caractéristiques du terrain). Cette vitesse est le seuil séparant le régime d'écoulement laminaire (à perte de charge proportionnelle à la vitesse) du régime d'écoulement turbulent. Dimension : LT^{-1} . (Schoeller, 1955).

2. Vitesse de déplacement : est vitesse de transport d'eau souterraine déduite de données d'expérience in situ, notamment d'un traçage, d'après un temps de parcours rapporté à une distance entre deux points déterminés, par une méthode d'interprétation de la distribution des temps de séjour observée (courbe de restitution). Dimension : LT^{-1} . Symbole : v . (G. Castany, J. Margat, 1977).

3. Vitesse de filtration : est vitesse macroscopique fictive d'un flux d'eau en mouvement uniforme à travers un milieu aquifère saturé (vecteur de vitesse de la loi de Darcy) déduite du débit d'écoulement rapporté à la section totale de l'aquifère traversé par le flux. Elle n'a pas de signification cinématique à l'échelle particulière ou moléculaire. Dimension : LT^{-1}

Symbole : V , ou V en écriture vectorielle. N.B. : Concept équivalent à celui de débit unitaire

(Mayer, 1947).

4. Vitesse effective : Quotient de la vitesse de filtration (du débit unitaire) par la porosité cinématique : vitesse macroscopique de charge sont proportionnelles à une puissance n de la vitesse (n étant une constante liée aux caractéristiques du terrain). Cette vitesse est le seuil séparant le régime d'écoulement laminaire (à perte de charge proportionnelle à la vitesse) du régime d'écoulement turbulent. Dimension : LT^{-1} . (Schoeller, 1955).

5. Pertes de charge dues au puits : sont composantes du rabattement observé dans un puits réel en exploitation dues aux caractéristiques du puits, notamment à l'écoulement (parfois turbulent) à travers la crépine, de Dimension : L. (G. Castany, J. Margat, 1977).

I.6. Notions identifiant et caractéristiques d'un forage d'eau :

Bien sûr tout ouvrage ayant des éléments et des propriétés qui le caractérisent. les forages d'eau ont des caractéristiques qui les différencient on cite :

1. Coupe hydrogéologique : c'est une représentation en plan vertical des conditions hydrogéologiques suivant une coupe donnée : coupe géologique mettant en évidence les contrastes de perméabilité et la structure des aquifères, complétée par les profils piézométriques, par des indications sur les échanges entre les nappes et la surface, et éventuellement par des traces de surface équipotentielle et des lignes de courant schématiques. (Castany, 1968).

2. Epaisseur efficace : est déduite avec précision à la suite de tests au micro-moulinet, 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 diaggraphie gamma-ray dans le forage permet d'apprécier le pourcentage relatif des passées argileuses de l'aquifère. (G. Castany, J. Margat, 1977).

3. Hauteur de pénétration. Hauteur de la partie d'un puits incomplet pénétrant et captant (hauteur crépine notamment) un aquifère. Dimension : L. (G. Castany, J. Margat, 1977).

4. Degré de pénétration : est rapport entre la hauteur de pénétration d'un puits incomplet et la puissance aquifère locale. Sans dimension. (G. Castany, J. Margat, 1977).

5. Niveau naturel (statique) : est le niveau piézométrique non influencé dans un puits, un piézomètre, auquel se réfère le rabattement ou le relèvement. S'oppose à un niveau dynamique influencé. Il peut s'agir d'un niveau observé non influencé, ou d'un niveau corrigé (par soustraction d'une influence calculée). (Andrimont, 1902).

6. Niveau dynamique : est le niveau piézométrique influencé (rabattu ou relevé) par opposition au niveau naturel au même point ; plus particulièrement, plan d'eau rabattu ou relevé, stabilisé ou non, dans un puits de pompage ou un ouvrage d'injection. (G.Castany, J. Margat, 1977).

7. Niveau stabilisé : est niveau dynamique stationnaire maintenu constant, soit par établissement du régime permanent (stabilisation}, soit par variation du débit pompé, ou encore par superposition d'influences à résultante nulle. (G. Castany, J. Margat, 1977).

8. Productivité :

La productivité d'un forage « est le débit maximum qui peut être pompé dans l'ouvrage, pendant une durée définie, sans que le rabattement induit par le pompage ne dépasse le rabattement maximum admissible » (M.Detay, 1993).

La productivité d'un aquifère dépend de l'extension du réservoir (épaisseur, 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.

9. Absorptivité : est débit maximal qu'un *puits absorbant* peut accepter dans des conditions définies (notamment en fonction d'une surcharge maximale possible). Inverse de la productivité d'un puits. Dimension : $L^3 T^{-1}$.

10. Débit spécifique : est débit pompé dans un puits rapporté à la hauteur de rabattement dans le puits, dans des conditions définies. Dimension : $L^2 T^{-1}$. Symbole : q_s .

11. Débit critique : est débit maximal pouvant affluer d'un aquifère à un puits de pompage en écoulement laminaire, c'est-à-dire sans dépassement de la vitesse critique. En pratique, c'est le débit pompé au-delà duquel les pertes de charge ne croissent plus en fonction linéaire du débit. Dimension : $L^3 .T^{-1}$. (Castany, 1963).

12. Efficacité du puits : est le rapport entre la productivité d'un puits réel, plus ou moins imparfait, et la productivité d'un puits parfait (n'imposant aucune perte de charge parasite), placé dans les mêmes conditions. En pratique c'est, pour un débit de pompage donné, le rapport entre le débit spécifique observé au bout d'une durée conventionnelle (par exemple 24 h) et le débit spécifique calculé pour la même durée d'après les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et un modèle d'écoulement autour du puits supposé parfait (Bonnet). Sans dimension. (Bonnet, 1970).

13. Rabattement résiduel : est rabattement observé après arrêt d'un pompage à un instant donné pendant la remontée dans le puits d'essai ou dans un piézomètre en tout point de l'aire de dépression. Dimension : L. Symbole : S_r . (Gélis, 1956).

14. Rabattement spécifique : est hauteur du rabattement dans un puits rapportée au débit pompé, dans des conditions définies (S/Q). Dimension : $L^{-2} T$. (Gélis, 1956).

15. Le rabattement maximum admissible S_{max} : est quant à lui imposé par les caractéristiques physiques et techniques de l'ensemble forage-aquifère : il doit être inférieur au rabattement critique S_c correspondant au débit critique Q_c évalué par les essais de forages : $S_{max} < S_c$. Des considérations économiques (coût de production de l'eau) peuvent aussi intervenir pour fixer le rabattement maximum admissible. (G. Castany, J. Margat, 1977).

16. Courbe débits/rabattements : est représentation graphique de la relation entre les débits pompés et les rabattements obtenus dans un puits, définis soit en régime permanent (paliers de niveau stabilisé) soit au bout de durées de pompage égales choisies conventionnellement. Dimension : $L^3 T^{-1} f(L)$. Bien qu'encore couramment en usage pour désigner la relation entre débits pompés et rabattements. (G. Castany, J. Margat, 1977).

17. Courbe de descente : est graphique représentant l'évolution du niveau rabattu, ou du rabattement en fonction du temps, pendant un pompage, en un point donné dans l'aire d'influence du pompage (échelles arithmétique, semi-logarithmique ou bilogarithmique). Sa signification est liée notamment à la connaissance de l'évolution du débit prélevé au cours du

pompage et de la distance d'éventuelles limites (et de leurs conditions). (G.Castany, J. Margat, 1977).

Dimension : $L f(T)$. A distinguer de courbe de décharge (variation de niveau naturelle).

18. Courbe d'égal rabattement : est la ligne idéale ou lieu des points d'égal rabattement déterminé autour d'un puits en pompage, à un même instant si le régime est transitoire.

19. Courbe de remontée : est graphique représentant l'évolution du niveau rabattu, ou du rabattement résiduel, en fonction du temps, après arrêt du pompage ou fermeture d'un puits artésien jaillissant (remontée de pression), jusqu'au rétablissement du niveau naturel.

Dimension : $L f(T)$.

20. Rayon d'influence : est distance radiale, depuis l'axe d'un puits exploité, à laquelle le rabattement déterminé (ou le relèvement s'il s'agit d'une injection) est nul, ou en pratique négligeable. Dimension : L. Symbole : R. (Samsoen, 1941).

21. Rayon efficace : est rayon du puits idéal (réalisé sans remaniement du terrain, ni colmatage par la boue de forage, et parfait : pertes de charges négligeables dans le massif filtrant et à la paroi du puits) qui fournirait le même débit spécifique que le puits réel, pour la même durée et pour le même rabattement, si le terrain était homogène et si les paramètres qui le caractérisent et servent à calculer ce rayon- sont exacts (d'après de Cazenove). Dimension : Symbole : R_e . (Gélis, 1956).

22. Cône de relèvement : est surface idéale ou lieu géométrique des relèvements imposés à différentes distances autour d'un puits, d'un ouvrage d'injection, et définis au bout d'un même temps d'injection si le régime est transitoire ; elle se représente par des courbes d'égal relèvement. (G. Castany, J. Margat, 1977).

23. Chute de pression résiduelle : est différence entre la pression artésienne statique et la pression artésienne observée pendant la remontée de pression, correspondant à un rabattement résiduel. Dimension : $M L^{-1} T^{-2}$.

24. Cône de dépression : est surface idéale ou lieu géométrique des courbes de dépression, des rabattements imposés à différentes distances autour d'un puits exploité, d'un captage, et définis au bout d'un même temps de pompage si le régime est transitoire ; elle se représente par des courbes d'égal rabattement. (R.Andrimont, 1903).

25. Jaillissement : est écoulement d'eau spontané issu d'un puits ou forage artésien jaillissant ouvert, déterminé par la pression artésienne. (G. Castany, J. Margat, 1977).

26.Fonction de puits : est fonction exponentielle intégrale reliant le rabattement mesuré à une distance donnée d'un puits de pompage, complet, parfait et de rayon nul, et après une durée défmie, au débit pompé constant et aux caractéristiques de l'aquifère. Symbole : $W(u)$. (G. Castany, J. Margat, 1977).

I.7.L'écoulement autour des forages d'eau :

L'écoulement autour du forage d'eau est écoulement souterraine identifié par des paramètres (débit, vitesse.....), et un régime. Les types et les régimes d'écoulement possibles à décrire autour des forages d'eau sont les suivants :

1.Écoulement permanent : est un écoulement à flux constant sous des conditions de potentiel invariables dans le temps. S'oppose à l'écoulement transitoire. (Pochet, 1905).

2.Écoulement transitoire : est écoulement dont le flux et la direction, en un point donné, varient dans le temps. S'oppose à l'écoulement permanent. (Gélis, 1956).

3.Écoulement turbulent : est mouvement d'un fluide dont la vitesse réelle est supérieure à la vitesse critique pour des conditions déterminées, définies par le nombre de Reynolds, donc avec perte de charge non proportionnelle au débit. L'écoulement turbulent en milieu perméable n'est pas soumis à la loi de Darcy. S'oppose à l'écoulement laminaire. (Samsøen, 1941).

4.Écoulement laminaire : mouvement d'un fluide dont la vitesse réelle est inférieure à la vitesse critique pour des conditions déterminées, définies par le nombre de Reynolds, donc avec perte de charge proportionnelle au débit. S'oppose à l'écoulement turbulent. (Schneebeili, 1955).

Autre contexte (désplaine) :

5.Écoulement uniforme : Écoulement dont les débits unitaires et la direction sont les mêmes en tous points du domaine aquifère considéré (massif filtrant) (à l'échelle macroscopique). (G. Castany, J. Margat, 1977).

6.Écoulement non uniforme : est écoulement dont les débits unitaires et les directions différent selon les points du domaine considéré (massif filtrant). (G.Castany, J. Margat, 1977).

7. Régime influencé : est régime d'écoulement d'une source, des eaux souterraines en période d'alimentation de l'aquifère, par opposition au régime non influencé.(Maillet, 1905).

8. Régime non influencé : est régime d'écoulement d'une source, des eaux souterraines en période sans alimentation de l'aquifère par opposition au régime influencé (cf tarissement). (Maillet, 1905).

I.7.Problèmes posés par l'eau souterraine :

Lorsqu'un ouvrage souterrain traverse un terrain aquifère, il fonctionne comme un drain et modifie très sensiblement les conditions d'écoulement de la nappe. Sa probabilité de rencontrer des venues d'eau est élevée, surtout s'il est réalisé sous une couverture rocheuse importante. Deux conséquences distinctes doivent alors être envisagées :

- d'une part le rôle des eaux souterraines sur les conditions de réalisation et de stabilité de l'ouvrage ;
- d'autre part l'impact hydrogéologique de l'ouvrage sur son environnement naturel et humain. (E.Gilli, C.Mangan, J.Mudry, 2004).

Conclusion :

Un forage d'eau est destiné à permettre l'extraction de l'eau contenue dans une formation aquifère, le type de forage dépendra de la nappe exploitée. Les caractéristiques de l'aquifère et surtout les caractéristiques des eaux souterraines peuvent influencer l'ouvrage (son équipement) et même elles peuvent influencer la productivité de cet ouvrage, cet effet dépendra ainsi aux règles ou à la planification suivie pour réaliser cet ouvrage.

Les forages anciens sont sujets à des phénomènes de colmatage dû à la minéralisation et au développement de films bactériens qui affectent les crépines du tubage, le massif filtrant et le terrain environnant ce qui nécessitent une réhabilitation pour corriger ces problèmes. Le chapitre suivant permettra de préciser les différentes techniques de réhabilitation.

Chapitre II :

Les Techniques de Réhabilitation des forages d'eau

II.1.Introduction :

La réhabilitation des forages d'eau, a un but d'améliorer leur productivité, et pour cela il faut améliorer la perméabilité de la formation aquifère située autour de la crépine et stabiliser cette formation; et Corriger les lésions qui touchent les forages (équipements) dans sa durée de vie, à l'aide de plusieurs techniques. Dans ce chapitre, nous abordons deux types d'intervention pour réhabiliter un ouvrage de captage d'eau (forage d'eau) qui sont le traitement et la transformation.

II.2.Les Techniques de traitement :

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

- par injection de produits chimiques dans le forage, destinés 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. (Ph.Maget, 2002).

II.2.1. Techniques de dissolution des dépôts et des incrustations :

Il est généralement souvent difficile sinon impossible d'enlever les anciens tubages ou crépines pour les nettoyer ou les remplacer, alors il faut utiliser d'autres méthodes pour la réhabilitation sans faire bouger les équipements de leur place.

II.2.1.1.Les Techniques mécaniques :

II.2.1.1.1.Traitement ou Nettoyage par brossage :

Il est possible de nettoyer les crépines à l'aide d'une brosse métallique rotative ou d'un grattoir, mais comme elles peuvent avoir été fragilisées par la corrosion, il convient de prendre garde à ne pas aggraver leur état.



Le brossage et le grattage mécanique avec un "hérissou" ressemblant aux outils utilisés par les ramoneurs, n'est efficace qu'à l'intérieur des tubages et crépines, et si les incrustations ne sont pas dures ou ont été ramollies par d'autres traitements. Les déblais sont ensuite évacués par pompage, notamment à l'émulseur. (R.DEGALLIER, 1985).



Figure II.02 Autre type de brossage raccordée à une tige de rotation. [10].

II.2.1.1.2. Traitement par pistonnage :

Cette technique exercée à l'aide d'un piston actionné verticalement dans les deux sens à l'intérieur d'un forage tubé et crépine. Dans son mouvement de remontée, le piston crée une dépression, au-dessous de lui, qui attire l'eau et le sable fin de la formation vers la crépine. Ce sable traverse la crépine et s'accumule à l'intérieur. On l'extrait ensuite par cuillérée. On peut prévenir, sous la crépine, un tronçon de tube plein de même diamètre, précisément pour recevoir le sable introduit par la course ascendante du piston. Dans son mouvement de descente, le piston comprime la nappe, refoule, loin dans le terrain, les fines particules qui n'ont pas été entraînées par opération précédente. Ils restent en ces points éloignés la vitesse de l'eau ne sera pas suffisante pour les en chasser. Le classement des matériaux de la formation, tout autour et au voisinage immédiat de la crépine, s'opère progressivement dans cette zone sensible. Les plus gros touchent la crépine et les plus fins en demeurent les plus éloignés, mais chacun finit par rester à sa place et les ponts de sable ne peuvent se produire à cause de l'alternance du flux. (A.MABILLOT, 1971).



Aspect de piston avant le traitement



Aspect de piston après traitement

Figure II.03 : représente le piston de nettoyage.

Mode opératoire :

1. Descendre le piston dans le forage jusqu'à ce qu'il touche l'eau.
2. Commencer à pistonner doucement, puis augmenter la cadence et la course, mais sans laisser le câble mollir.
3. Continuer ainsi pendant quelques minutes : le foreur sentira à la tension du câble et au bruit de l'outil que le sable a pénétré dans la crépine.

4. Sortir alors le piston et descendre une cuiller à clapet ou une pompe à sable.
5. Noter la cote du niveau du sable et l'extraire.
6. Recommencer à pistonner, puis à curer et comparer les niveaux et les volumes de sable extraits aux divers cycles d'égale durée.
7. Continuer ainsi jusqu'à ce qu'aucune venues de sable ne se produise.
8. L'opération peut durer de quelque heure à plusieurs semaines.
9. Augmentation la durée du pistonnage de chaque cycle si la venue du sable décroît d'un cycle à l'autre. (A.MABILLOT, 1971).

II.2.1.2. Les techniques physiques :

Traitement est destiné à parfaire le nettoyage du trou, de la crépine et de massif de gravier et à améliorer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère autour de la crépine, dans le but d'augmenter le débit exploitable et de produire une eau propre. La perméabilité du terrain près de crépine est ainsi améliorée, notamment par élimination dans cette zone du maximum d'éléments fins et par restriction et stabilisation du massif de gravier.

II.2.1.2.1. Traitement par pompage alterne :

On met le forage en production par pompage et on provoque, à plusieurs reprises, des arrêts brusques de la pompe. On crée ainsi des variations brutales de pression qui ont pour effet de développer la formation. On emploie de préférence une pompe centrifuge classique à axe vertical, sans clapet de pied, mais l'on doit prévoir une assez grande fatigue du matériel utilisé.

1) Premier procédé : on utilise la pompe à sa capacité maximum jusqu'à obtenir le plus grand rabattement possible du niveau de l'eau. On arrête alors la pompe et toute l'eau de la colonne d'aspiration retombe dans le forage pendant que le niveau remonte à sa cote de départ. On recommence l'opération autant de fois que nécessaire.

2) Deuxième procédé : même précédemment, mais dès qu'on a obtenu le rabattement maximum et arrête la pompe, au lieu d'attendre que le niveau remonte à sa cote de départ, on recommence le pompage presque aussitôt. Cela a pour effet d'agiter fortement l'eau au fond de la crépine. Il faut cependant prendre garde de ne pas remettre la pompe en marche avant son arrêt complet pour ne pas risquer une rupture de l'arbre.

3) Troisième procédé : sans chercher à obtenir le rabattement maximum, on pompe jusqu'à ce que l'eau se déverse à la surface ; on arrête pompe, ce qui libère toute la colonne d'eau, et on recommence. Il s'en suit de brefs et puissants chocs de pression sur la couche productrice, à une fréquence beaucoup plus grande que dans les autres procédés. (A.MABILLOT, 1971).

II.2.1.2.2. Traitement par jet d'eau :

S'il est fait systématiquement, le nettoyage par injection d'eau sous pression peut être un moyen particulièrement efficace pour décolmater et de nettoyer les surfaces internes des forages. Le lavage au jet sous pression est une des plus récentes et des meilleures méthodes de développement. C'est aussi la plus simple et la moins coûteuse. Un

outil à jet, très facile à construire, une pompe à haute pression, la tuyauterie, rigide ou souple, la robinetterie et la cuveriez correspondantes constituent tout l'équipement. Les puissants jets d'eau ou de solution chimique sont projetés, à travers la crépine, dans la formation, ou dans le massif de gravier additionnel qui l'entoure. Par la lente rotation de cet outil, combinée avec un mouvement vertical de va-et-vient, la surface entière de la crépine est soumise à l'action vigoureuse des jets.

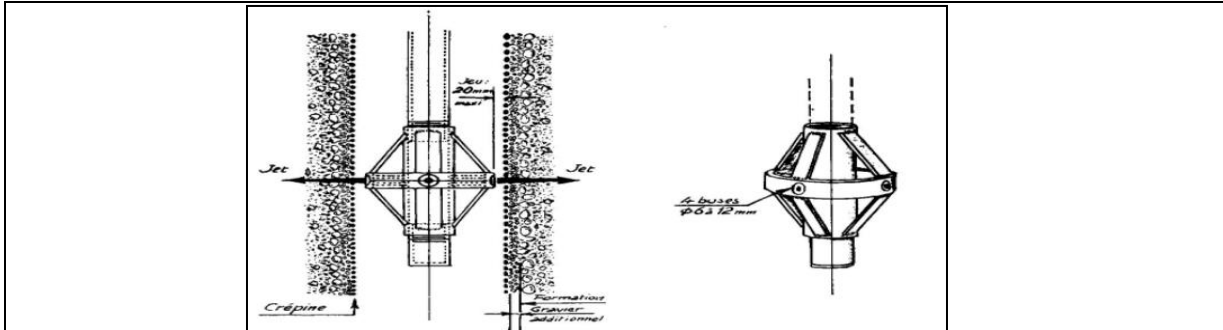


Figure II.03 : Développement par lavage au jet.
(A.MABILLOT, 1971).

Procédé de technique : la turbulence ainsi créée déplace le sable fin, le limon ou l'argile, qui pénètrent dans la crépine, au-dessus et au-dessous du point où l'on opère. Ces éléments peuvent être retirés, soit par pompage (pompe ou émulseur), soit par cuillère. L'outil à jet comprend deux ou quatre buses horizontales de 6 à 12mm d'ouverture ; il est monté à la base d'une colonne rigide de tube de 2 pouces, de la ligne de sonde, ou, même, d'un flexible de refoulement. Pour que l'énergie du jet soit utilisée au maximum sur la formation et ne soit pas perdue à l'intérieur de la crépine, il est bon que l'extrémité de chaque buse ne soit pas distante de plus de 20mm de la crépine. L'efficacité du procédé dépend beaucoup de la pression du jet. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des pressions de 50 à 70 kg/cm², cependant, on peut déjà commencer à opérer avec des pressions de 7 à 8 kg/cm² surtout si on a pu éliminer le cake de la formation avant la pose de la crépine.(A.MABILLOT, 1971).

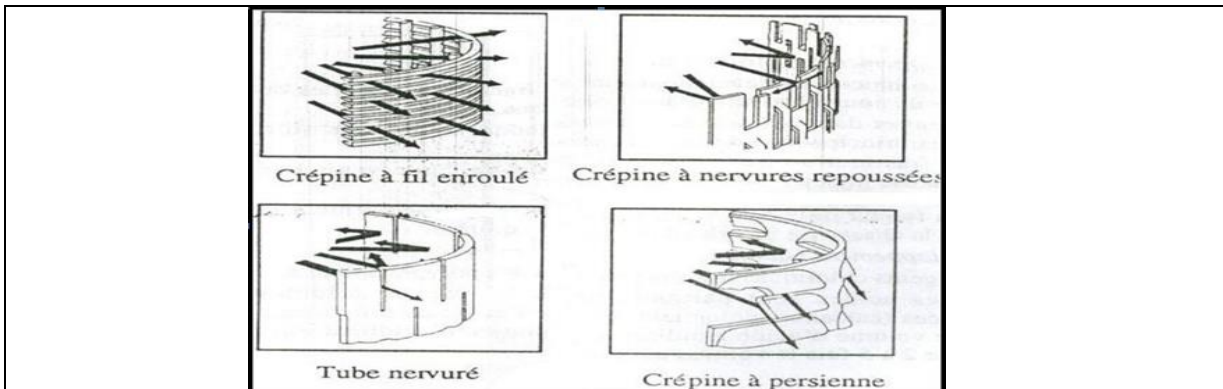


Figure II.04 : influence du type d'ouverture de la crépine sur l'efficacité du développement au jet sous pression.

On comprend bien, aussi, que la forme des fentes de la crépine et son mode de construction jouent un rôle considérable dans l'opération de lavage au jet. En effet, la

crépine se trouve placée entre le jet et le terrain à développer. Selon le mode de construction, elle peut constituer un obstacle ou, au contraire, améliorer l'action du jet. Les crépines qui répondent le mieux à ce traitement sont celles ayant un coefficient d'ouverture élevé et des fentes continues, comme les crépines à fil profilé en V enroulé en spirale, notamment les crépines Johnson (fil enroulé).

II.2.1.3. Traitement par effet d'onde de choc de cisaillement :

II.2.1.3.1. Tir à l'explosif :

Le tir à l'explosif est parfois efficace pour décoller des incrustations. On fait exploser de petites charges placées à intervalles réguliers le long de l'objet à traiter, de façon qu'elles engendrent une onde de choc continue, d'énergie suffisante pour désagréger les dépôts, mais suffisamment faible pour ne pas endommager les tubes et crépines. (R. DEGALLIER, 1985).

II.2.1.3.2. La Technique air burst :

La technique air burst est une méthode récente et brevetée de réhabilitation des forages. Elle consiste à utiliser de petits volumes de gaz inerte pour générer des « pulsations de pression » à haute intensité dans certaines zones à l'intérieur d'un puits. Les pulsations sont provoquées à l'aide d'un outil spécial, créent des bulles d'air et des chocs acoustiques à haute fréquence, qui pulvérisent les incrustations et les dépôts minéraux et organiques sur les parois et les crépines du forage. Les bulles de gaz provoquent un va-et-vient de l'eau qui entre et sort de la formation adjacente à l'outil, déplaçant les sédiments, les débris d'incrustations et les fragments de biofilm, qui sont évacués dans le forage et peuvent ensuite être nettoyés par la technique classique de l'air lift.

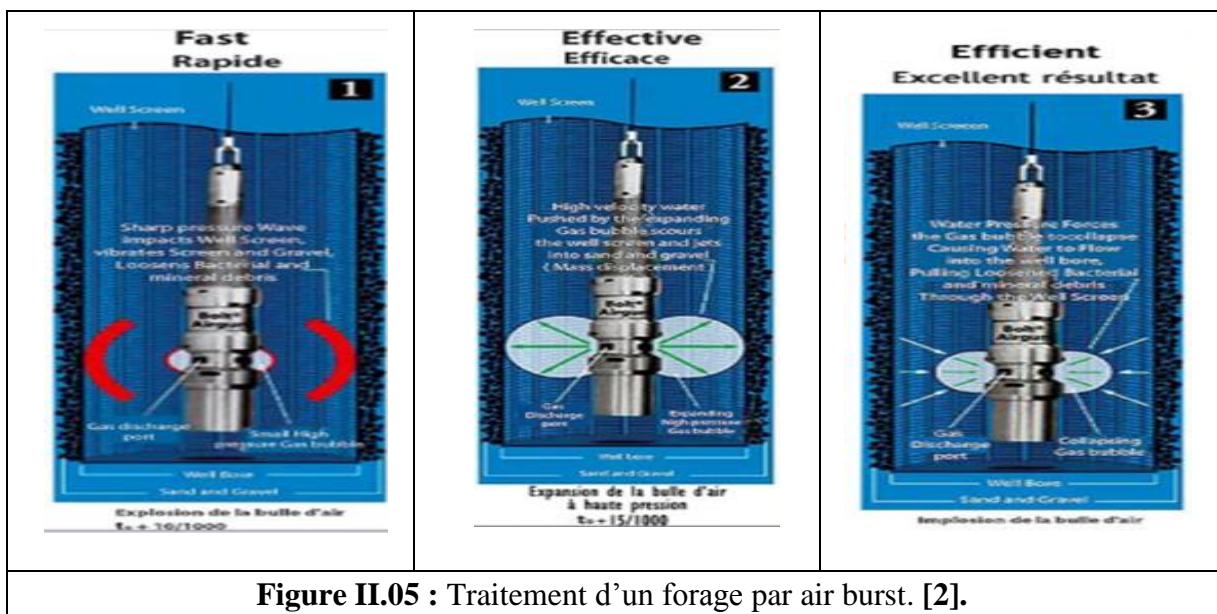


Figure II.05 : Traitement d'un forage par air burst. [2].

La technique air burst peut permettre de développer chaque partie de la structure du forage avec des jets multiples et ajustables, qui peuvent être adaptés au diamètre, au

type ou à l'âge du forage. Cependant, c'est une technique spécialisée probablement mieux adaptée aux forages à haut rendement gravement détériorés dans les champs de captage utilisés à des fins de production commerciale ou dépendant des services publics.

II.2.1.3.3. Fracturation hydraulique :

Les vieux forages réalisés dans des formations à faible débit, comme les roches cristallines précambriennes, peuvent être stimulés par un processus appelé «fracturation hydraulique». Définie comme création artificielle de fissures dans une roche cohérente soumise localement à une forte pression par injection d'eau (« claquage »), en vue de la rendre perméable, soit pour faciliter l'écoulement du fluide que la roche contient soit pour y injecter des résidus ou dans un but de stockage souterrain. (Colas R., Cabaud R., Vivier P. (1968)).

Cette technique ne peut s'appliquer qu'à des sections ouvertes sans tubage, par exemple vers le fond d'un trou. Tout d'abord, il faut procéder à un examen à l'aide d'une caméra vidéo ou à une diagraphie géophysique du forage afin d'évaluer s'il est adapté à ce traitement. La section à travailler devrait déjà être fracturée dans une certaine mesure et doit être isolée à l'aide d'un Parker quelconque, par exemple une série de joints d'étanchéité en caoutchouc qui peuvent être introduits dans le forage à l'aide d'un bélier hydraulique ou d'air comprimé depuis la surface.

Un tuyau d'injection est abaissé au centre du système d'étanchéité, puis de l'eau sous pression est injectée dans le forage afin de créer ou d'élargir les fractures. Il est possible d'ajouter du sable à l'eau afin de maintenir ouvertes « étayer » les nouvelles fractures créées. Des rapports indiquent que des augmentations de débit de 20 à 80 % ont été obtenues grâce à cette méthode. En fonction de la nature de la formation, des pressions de 35 bars (douce) à 140 bars (dure) sont utilisées. Après le traitement, l'eau et les débris sont ramenés à la surface par la méthode normale de l'air lift.

II.2.1.3.4. Procédé Hydropuls :

Il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement des forages permettant, sans adjonction de produits chimiques, l'onde de choc générée par le procédé Hydropuls va, de par sa pénétration radiale d'une dizaine de mètres, briser les concrétions qui entravent la libre circulation de l'eau.

II.2.1.3.4.1. Description du procédé Hydropuls :

Le principe fondamental de la génération d'impulsions par l'expansion soudaine d'un gaz ou d'un fluide hautement comprimé est appliqué depuis le début des années cinquante dans l'exploration sismique tout comme dans l'extraction pétrolière dans le cadre de différentes tâches. Au début des années quatre-vingt-dix, on a mis au point les premières modifications de la technique des impulsions pour l'utilisation comme procédé de régénération des puits.

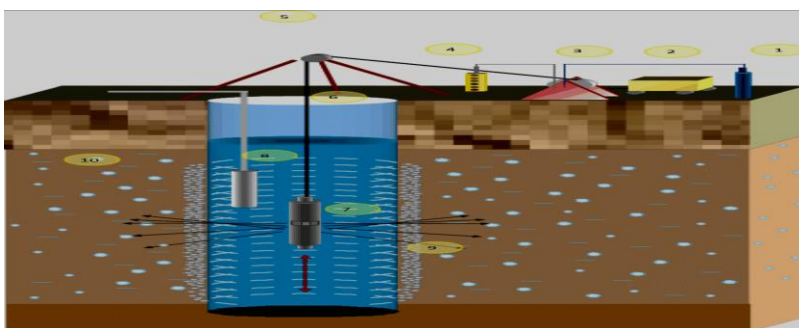
Le principe de fonctionnement consiste à générer des séquences d'impulsions de pression par entrée pulsée de portions de gaz ou d'eau sous haute pression au moyen d'un générateur d'impulsions introduit dans le puits sur un tuyau armé. Le générateur d'impulsions est équipé d'un système de soupapes qui permet de libérer l'énergie accumulée dans le générateur sous forme de gaz ou d'eau sous haute pression avec des temps de commutation très courts

(millisecondes), en générant des ondes de choc hydrauliques. Dans le même temps, le changement soudain de volume produit un effet de cavitation qui provoque la formation d'une « bulle de vide » qui finit par s'effondrer en produisant un « effet de souffle » hydraulique. L'effet alternant de la charge et de la décharge de pression provoque la désagrégation des fractions de grains fins, de dépôts minéraux, etc., accumulés dans la couche de graviers et l'espace lacunaire de la nappe aquifère. Les matières désagrégées sont transportées par l' « effet de souffle » au centre du puits où elles sont pompées. [5].

II.2.1.3.4.2. Caractéristiques du procédé Hydropuls :

La vitesse de la génération d'impulsion est de 2000 m/s env. et est réglable dans un certain spectre en cours d'opération :

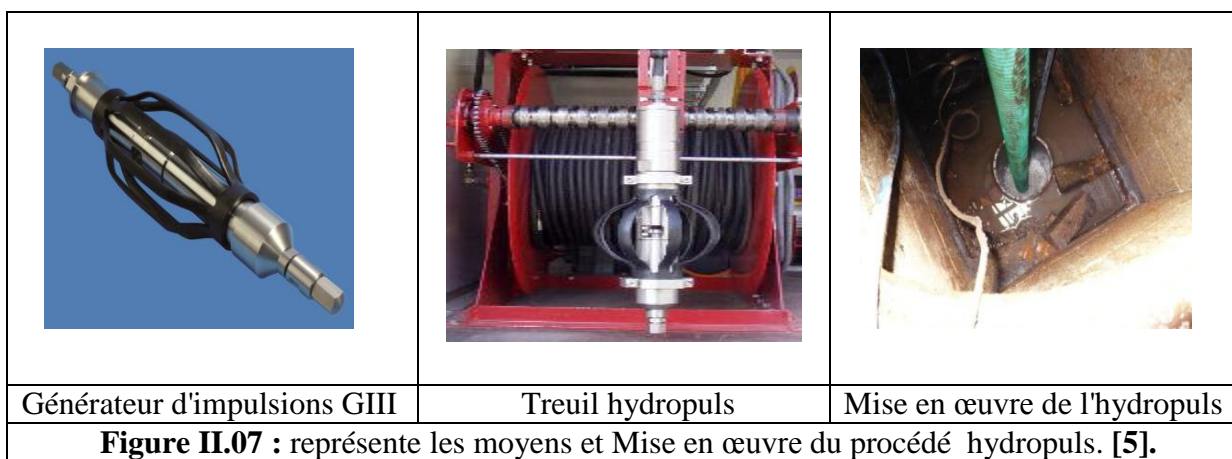
- ✓ il en résulte une impulsion douce de pression qui permet de traiter les matériaux de soutènement tels que PVC, PEHD, OBO et céramique ;
- ✓ production de séquences d'impulsions de pression dont l'ordre chronologique peut être adapté en cours d'opérations : en fonction des caractéristiques du puits, le procédé peut être réglé plus intensivement ou plus délicatement ;
- ✓ la hauteur de la pression de sortie de l'impulsion est variable, ce qui permet également une adaptation au matériau de soutènement et à l'état du puits ;
- ✓ application rapide et économique avec des conséquences techniques moindres. [5].



Légende :

1	Bouteilles d'azote	6	Tuyau sous pression
2	Générateur électrique	7	Générateur d'impulsions
3	Dévidoir de flexible	8	Air-lift
4	Unité de commande	9	Massif filtrant
5	Trépied avec poulie de guidage et compteur de profondeur	10	Nappe aquifère

Figure II.06 Moyens et mise en œuvre du procédé hydropuls. [5].



II.2.1.3.4.3. Les avantages du procédé hydro-puls :

Le procédé hydro-puls est du point de vue écologique un procédé totalement sans risques, puisque son application ne recourt à aucun apport de matières étrangères dangereuses pour l'environnement telles que les produits chimiques et les gaz explosifs. Il possède une grande profondeur de pénétration (jusqu'à 15 m) associée à une grande facilité de dosage et à une efficacité prouvée.

II.2.1.4. Traitement pneumatique (air-lift) :

Cette technique est la plus efficace si elle est bien adaptée et bien conduite. Elle présente l'avantage de n'entraîner aucune détérioration du matériel employé. Elle permet de combiner l'action de flux et de reflux provoquée par de grands volumes d'air introduit dans l'ouvrage avec celle de mise en production par air lift (éjecteur ou émulseur). Ils existent deux méthodes de son utilisation pour traitement :

II.2.1.4.1. La méthode à forage ouvert : La figure II.08a montre le montage à réaliser. L'opération consiste à alterner les phases de pompage à l'air-lift et de soufflage brusque. Cette dernière phase est réalisée en descendant le tube d'air à l'intérieur de la crépine. Pour faciliter la manœuvre, le robinet d'air doit être du type « à boisseau », à ouverture et fermeture rapides « au quart de tour ». On procède ainsi :

- 1) Descendre le pied du tube d'eau à 0.60m environ du sabot de la crépine.
- 2) Descendre ensuite le tube d'air de façon que sa base soit à environ 0.30m au-dessus de celle du tube d'eau.
- 3) Fermer l'air et laisser la pression s'écouler l'eau pulsée par l'air-lift, jusqu'à ce qu'elle ne contienne plus de sable.
- 4) Fermer l'air et laisser la pression monter au maximum au compresseur.
- 5) Pendant ce temps, descendre le sabot du tube d'air à environ 0.30m au-dessous du sabot du tube d'eau, soit 0.60m plus bas que précédemment, et à 0.30m du fond de la crépine.
- 6) Ouvrir brusquement, le robinet d'air. L'eau sera violemment projetée au-dehors

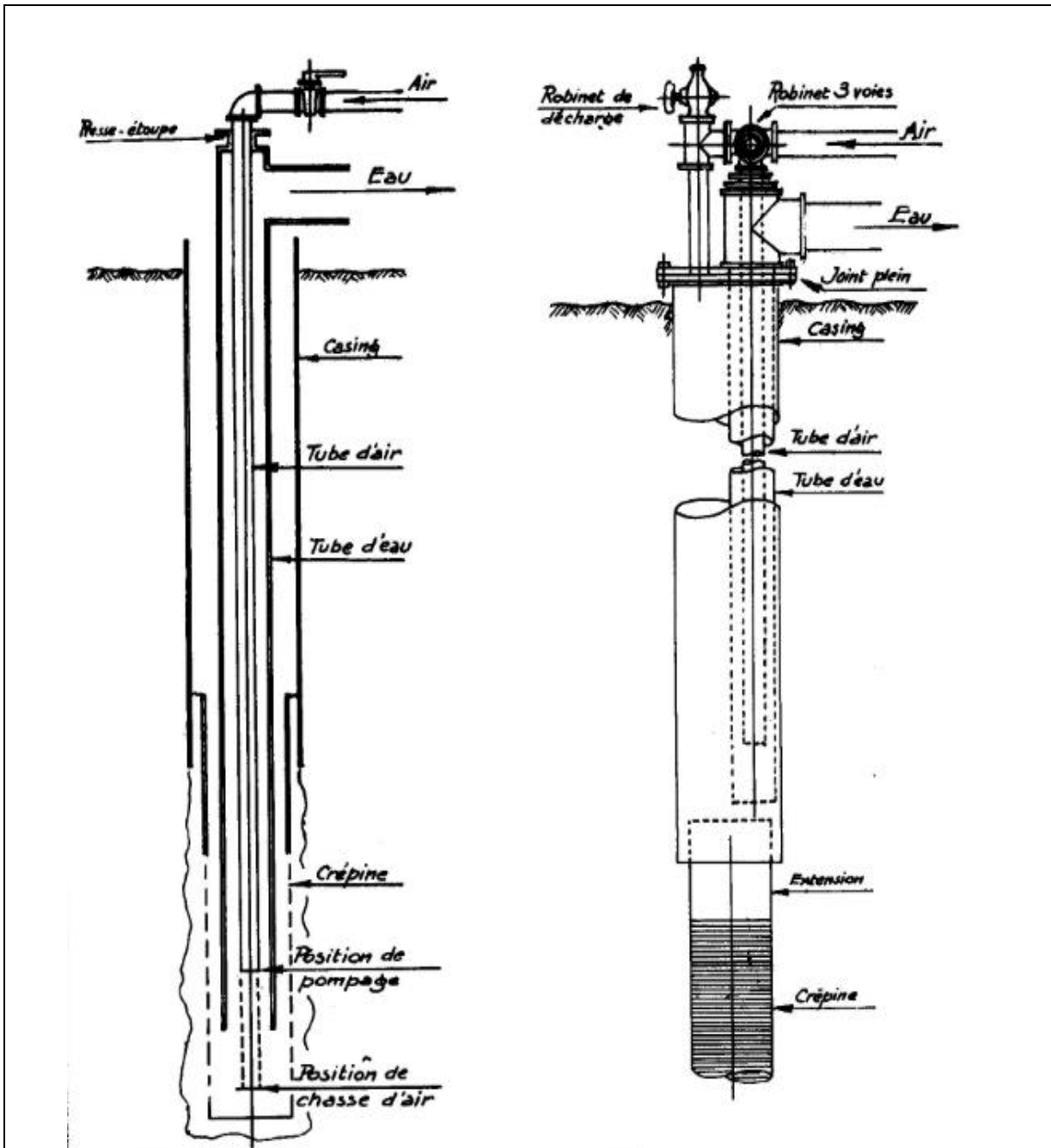
- par le tube d'eau et par le casing, mais pendant un temps très court.
- 7) Remonter ensuite le tube à sa première position, ce qui provoque un violent reversement de flux dans le tube d'eau et une grande turbulence dans la formation autour de la crépine. L'eau éjectée par air-lift s'écoule, très trouble, par le tube d'eau.
 - 8) Quand l'eau est redevenue claire, remonter le tube d'eau 0.60m à 1m et recommencer les opérations précédentes pour traiter la formation au nouveau niveau du sabot du tube d'eau, et ainsi de suite, sur toute la hauteur de la crépine.
 - 9) Il sera alors nécessaire de redescendre le tube d'eau à sa première position afin de sortir, par air-lift, le sable qui s'est déposé tout au fond de la crépine.
 - 10) Lorsque l'eau, extraite à ce dernier stade, sort claire, sans sable, on peut considérer que l'opération est terminée. (A.MABILLOT, 1971).

II.2.1.4.2. La méthode à forage fermé : La figure II.08b montre le montage à réaliser. Le casing est hermétiquement fermé par un joint plein que traverse le tube d'eau et qui comporte une ouverture raccordée à un robinet de décharge. Un robinet à 3 voies à boisseau permet d'opérer les manœuvres indiquées ci-dessous. Le procédé nécessite quelques précautions, car il peut entraîner un ébranlement du tubage en place, une détérioration de la cimentation et des éboulements dans la zone de production. Les opérations à réaliser sont les suivantes :

- 1) Manœuvrer le robinet 3 voies pour envoyer l'air dans la crépine, le robinet de la décharge étant ouvert.
- 2) Laisser couler, comme la méthode à forage ouvert, jusqu'à ce que l'eau éjectée sorte claire.
- 3) Laisser l'eau remonter à son niveau statique dans le forage, ce qu'on peut vérifier en écoutant l'air sortir par le robinet de décharge.
- 4) Fermer le robinet de décharge et manœuvrer le robinet 3voies pour envoyer l'air, par le tube supportant le robinet de décharge, à l'intérieur du forage, sous le couvercle du casing. L'eau sera refoulée, hors du tube d'eau, au niveau du sol, ainsi que, à travers la crépine, dans la formation adjacente, en brisant les ponts de sable ou de gravier.
- 5) Lorsque le niveau de l'eau dans le forage aura été rabattu jusqu'à sabot du tube d'eau, l'air sortira, par tube, à la surface. A ce moment, ouvrir le robinet de décharge et laisser l'eau remonter à son niveau statique, le robinet d'air étant fermé.
- 6) Manœuvrer le robinet 3 voies et provoquer à nouveau, par air-lift, le pompage du forage.
- 7) Répéter ces opérations jusqu'à ce que le forage ne produise plus de sable.
- 8) Il est alors rarement nécessaire de nettoyer le forage, car la grande vitesse de l'eau provoque généralement l'expulsion des sables fins. (A.MABILLOT, 1971).

Il n'en serait pas de même s'il s'agissait de sables grossiers ou graviers qui auraient pu pénétrer à travers une crépine trop ouverte ou de construction peu soignée, dans ce cas, il faudrait extraire à la soupape les matériaux qui s'y trouveraient. On remarque que, dans ce

procédé, le tube d'eau et le tube d'air restent fixes, ce qui n'était pas le cas dans la méthode à forage ouvert.



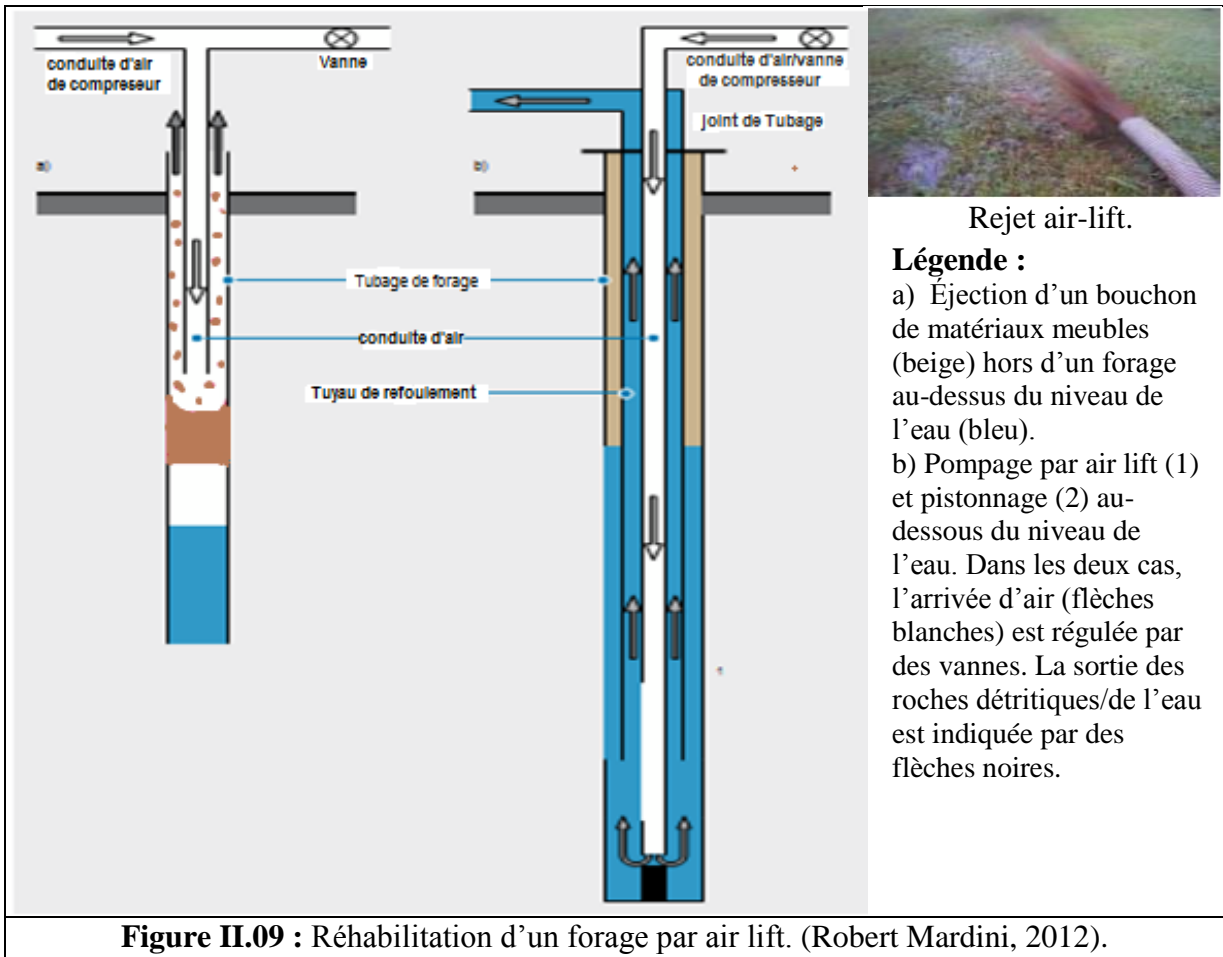
a-Développement à forage ouvert

b-Développement à forage fermée

Figure II.08 : les équipements de développement pneumatique. (A.MABILLOT, 1971).

II.2.1.4.3.méthode de procédé d'air lift :

Les méthodes typiques comprennent notamment l'utilisation d'un compresseur monté sur camion ou sur remorque, semblable à ceux normalement utilisés durant le forage (capacité minimale 7 bars/100 psis). La figure II.09 présente les installations de pompage par air lift les plus couramment utilisées. Ces schémas montrent quelles options sont à disposition pour enlever un bouchon peu profond et meuble au-dessus du niveau de l'eau avec le tubage ouvert (a), et pour le nettoyage par air lift en dessous du niveau de l'eau à l'aide d'un tuyau de refoulement à l'intérieur d'un tubage fermé (b, 1). Pour l'injection d'air, la conduite d'air est abaissée de façon à ce que son extrémité se trouve en dessous de l'orifice inférieur du tuyau de refoulement (b, 2). L'injection d'air et le nettoyage devraient être effectués en alternance et chaque processus répété cinq à six fois, ou jusqu'à ce que l'eau du forage soit propre. En plus de l'injection d'air, il est possible d'utiliser une foreuse pour redimensionner un forage sans tubage ou dont le tubage a été retiré. Un forage peut être alésé ou approfondi pour couper une plus grande partie de l'aquifère ou pour fournir un rabattement plus grand. (Robert Mardini, 2012).



II.2.1.5. Les Techniques chimiques :

Le traitement des forages par les techniques chimiques est basé sur l'injection des produits chimiques qui aident au nettoyage et ce à l'aide d'une pompe d'injection voir figure II.10.

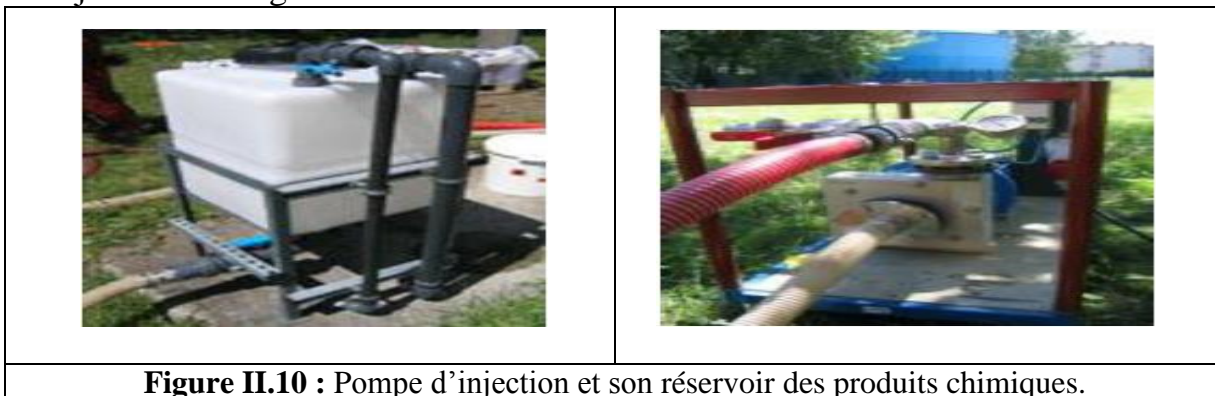


Figure II.10 : Pompe d'injection et son réservoir des produits chimiques.

II.2.1.5.1. Traitement par acidification :

C'est le traitement d'un forage, par injection d'acide. Pour les forages très endommagés, la solution la plus efficace sera sans doute une combinaison des méthodes physiques et chimiques. L'acidification (l'acide hydrochlorique) peut éliminer les incrustations de carbonate et les dépôts d'hydroxyde de fer lorsqu'ils ne sont pas encore cimentés.

Les dépôts de fer durcis devront être dissous à l'aide des méthodes physiques décrites ci-dessus. Une solution d'acide sulfurique à 30% par rapport au volume de la section crépitée ou ouverte à nettoyer peut être utilisée pendant 15 à 24 heures en agitant périodiquement l'eau du forage en y injectant de l'air.

Avant la mise en place de l'acide dans le forage, il est bon de faire un essai sur du carbonate de chaux et sur un échantillon du métal dont est faite la crépine.

1. Traitement à l'acide chlorhydrique :

Le traitement à l'acide chlorhydrique est le traitement le plus connu et le mieux adapté à la dissolution d'incrustations calcaires ou ferrugineuses, ou à la mise en suspension d'argiles sodiques, mais les déboires sont nombreux si des précautions ne sont pas prises pour maintenir en solution les oxydes de fer et d'alumine (pH à maintenir inférieur à 3), pour solubiliser les sulfates (pH supérieur à 5), et pour inhiber l'attaque des métaux.

Les inhibiteurs de corrosion des métaux du circuit d'injection de l'acide sont des polyamines et thiophènes arsenicaux dont l'effet dure quelques heures, mais qui sont à proscrire dans des puits d'adduction d'eau potable.

Le fer et l'alumine peuvent être maintenus en solution à des pH supérieurs à 5, à condition de mélanger à l'acide des agents "séparateurs", tels que le tartrate double de potassium et de sodium, l'acide lactique, ou l'acide citrique. Pour dissoudre Les sulfates de Ca, on ajoute du bi fluorure d'ammonium. La dissolution des carbonates est très rapide et l'acide est neutralisé à 95 % en 50 minutes, à 25°C en présence de dolomie. Une température plus élevée de 10°C diminue de moitié le temps de réaction. Il est donc inutile et

nocif de laisser agir l'acide plus d'une heure, ce qui est à tort souvent recommandé en pratique. De plus, Les effets secondaires gênants cités ci-dessus qui imposent l'adjonction d'adjuvants, ne se manifestent généralement pas dans cet intervalle de temps.

Plus L'acide sera dilué, plus les produits de dissolution seront fluides, et plus leur enlèvement sera facile.

L'anhydride carbonique, sous forme de neige carbonique, est utilisé au même titre que l'acide chlorhydrique, souvent en mélange, surtout pour solubiliser Les carbonates. Ajouté à l'acide chlorhydrique, il en retarde L'effet. (R.DEGALLIER, 1985).

L'acide chlorhydrique est acide dissout rapidement les carbonates de chaux. On y ajoute un inhibiteur destiné à ralentir l'attaque, par l'acide, des tubages et des crépines en acier ordinaire, mais ce produit est sans effet sur le zinc qui serait rapidement détruit par l'acide chlorhydrique, de sorte qu'on ne peut employer cet acide sur une crépine en acier galvanisé. Les oxydes de fer ou de manganèse sont quelque peu solubles dans l'acide chlorhydrique, mais si le pH est supérieur à 3, la réaction peut engendrer un précipité difficile à éliminer, de sorte qu'il est préférable d'employer une autre méthode si les incrustations contiennent, en majorité, des oxydes métalliques. L'acide chlorhydrique, dénommé aussi acide muriatique, est livré dans le commerce sous diverses concentrations. La plus employée est 20° Baume qui donne, à 15 °C. 31,69 % en poids d'acide chlorhydrique, et, par conséquent, se trouve livrée avec 68,31 % d'eau. La solution a une densité supérieure à celle de l'eau, ce qui facilite son utilisation au fond des forages. La livraison s'effectue sous forme de bonbonnes en verre ou en matière plastique contenant généralement 70 kg de solution, ou en wagons ou camion-citerne garnis d'ébonite La vidange au lieu d'utilisation s'effectue par gravité, par siphonage ou sous pression faible : 0,5 bar. L'inhibiteur peut être constitué par de la aléa-tine qu'on fait fondre dans de l'eau très chaude. Le dosage est de 2 à 3 kg de gélatine pour 400 litres d'acide. (A.MABILLOT, 1971).

Précautions :

L'acide chlorhydrique concentré du commerce peut occasionner des brûlures profondes de l'épiderme. Les vapeurs sont toxiques et peuvent déterminer des maux de tête et des nausées. Il est recommandé de porter des gants de caoutchouc et des lunettes. Si l'opération s'effectue dans un bâtiment (station de pompage), il convient de ventiler largement et même de porter un masque respiratoire. On peut neutraliser avec du carbonate de soude une projection d'acide sur la peau ou sur les vêtements. Il importe, au préalable, de s'assurer que dans un rayon de 50 à 100 mètres, il n'existe aucun puits, forage ou source en exploitation.

2. Traitement à l'acide sulfamique

Bien que nettement moins connu que l'acide chlorhydrique, ce produit présente de nombreux et importants avantages pour son application en forages d'eau. L'acide sulfamique, ou Amin sulfonique, $\text{NH}_2\text{SO}_2\text{H}$, connu depuis le XIX^e siècle, n'est réalisé industriellement que depuis les années 1950. Il est employé surtout pour le détartrage du matériel alimentaire et industriel. C'est un solide cristallisé, incolore et non hygroscopique. Sa solubilité dans l'eau varie avec la température : ainsi, 100 grammes d'eau dissolvent :

- à 0 °C environ 15 grammes d'acide sulfamique cristallisé ;
- à 15 °C, environ 20 grammes ;
- à 30 °C, environ 26 grammes ;
- à 80 °C, environ 47 grammes.

Son action sur les matières incrustantes des forages d'eau est beaucoup plus forte que celle de l'acide chlorhydrique. Les sels ainsi formés - sulfamates de calcium ou de magnésium, notamment- sont nettement plus solubles dans l'eau que les sels correspondants provoqués par les autres acides. L'acide sulfamique cristallisé est livré en sacs papier, doublés intérieurement de polyéthylène contenant 50 kg de produit sec. On peut le stocker, le transporter et le manipuler sans précaution particulière tant qu'il reste à l'état cristallisé. Sous cette forme, il n'est pas toxique et n'attaque pas la peau ni les voies respiratoires. La solution n'est préparée qu'au chantier, au moment de l'emploi. Pas de transport, en retour, de bonbonnes vides ou pleines, ni de containers, comme c'est le cas pour l'acide chlorhydrique.

Une fois dissous, l'acide sulfamique est très peu corrosif envers les métaux, en particulier les métaux cuivreux et les aciers inoxydables qui ne sont pratiquement pas attaqués. Sur les aciers courants, son action est plus lente que celle de l'acide chlorhydrique. On peut ajouter un inhibiteur, la THIOUREE, fourni également par KUHLMANN, qui permet de réduire encore cette très légère agressivité. Par contre, comme l'acide chlorhydrique, il est absolument contre-indiqué d'employer l'acide sulfamique sur du zinc ou de l'acier galvanisé.

Sur chantier, on peut préparer la solution dans un bac et l'introduire dans le forage, sous pression ou non, de la même manière que l'acide chlorhydrique. Ne pas oublier qu'une fois dissous, l'acide sulfamique se comporte exactement comme l'acide chlorhydrique, d'où : mêmes précautions : gants, lunettes, masques, ventilation, etc. On peut aussi verser directement dans le forage la quantité requise d'acide sulfamique cristallisé. La dissolution s'opérera dans l'eau contenue dans l'ouvrage, elle sera accélérée par l'agitation à la cuillère, mais, selon les dosages déjà indiqués, en fonction de la température de l'eau dans le forage. L'addition d'un produit « mouillant » peut, enfin, améliorer encore l'action de l'acide sulfamique sur les incrustations. Le II est cependant nécessaire d'employer de fortes concentrations (100 à 200 parties de chlore libre pour un million de parties de solution).

3. Les modes d'acidification :

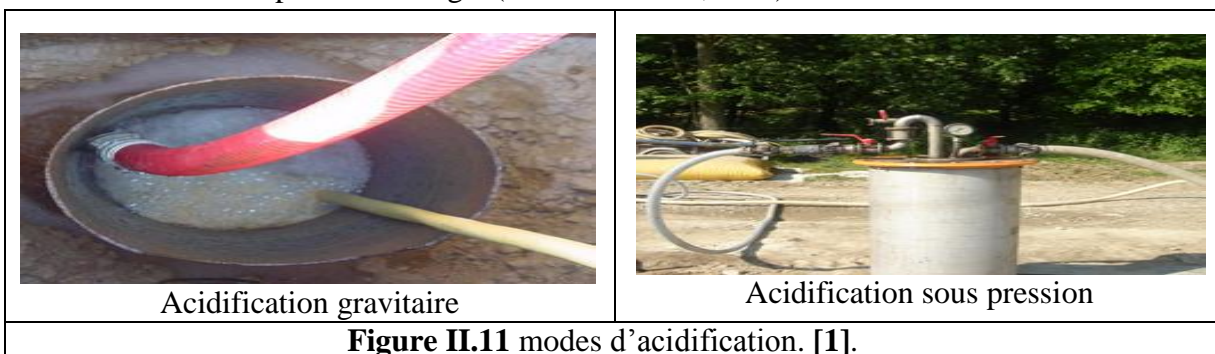
3.1. Acidification à basse pression :

Un tube en acier ordinaire ou en matière plastique de 25 à 35 mm de diamètre, plongeant jusqu'au fond de l'ouvrage et supporté par une bride posée sur le sommet du tubage, est muni d'un raccord en T. L'acide est employé tel qu'il est livré. Le volume à prévoir est de 1,5 à 2 fois le volume intérieur de la crépine. Si la longueur de celle-ci est supérieure à 2 mètres, il est préférable d'injecter en premier nue la moitié de la solution, puis de remonter le tube au sommet de la crépine et d'introduire l'acide restant. Les gaz produits ont pour effet de chasser une certaine quantité d'eau qui peut contenir encore de l'acide. On pourra la renvoyer dans le forage pour parfaire l'attaque des incrustations. Il est nécessaire d'agiter l'acide dans l'ouvrage au moyen d'un piston ou d'une cuillère. L'emploi de celle-ci permet d'extraire, du

même coup, les sédiments et les boues résultant du tracement. L'agitation doit être poursuivie pendant une ou deux heures, après quoi, l'on pourra extraire les dépôts jusqu'à ce que l'eau redevenue claire. En manœuvrant la cuillère, l'on apprécie tout de suite si le traitement a permis d'améliorer le débit. On pourra, s'il y a lieu, recommencer l'opération, une ou plusieurs fois, avec les mêmes quantités d'acide, en prolongeant, au besoin, la durée de l'agitation. (A.MABILLOT, 1971).

3.2. Acidification sous pression :

En raccordant le tube d'injection à une pompe spéciale, l'acide peut être envoyé, sous pression, dans la crépine. La pompe aura tous ses organes en contact avec l'acide, construits en acier inoxydable : tiges, pistons, chemises, etc. Elle aura été éprouvée à trois ou quatre fois la pression d'injection qui est de l'ordre de 150 bars pour un débit de 400 litres/minute. Le tube d'injection sera en acier et monté sur le couvercle du tubage par des raccords filetés éprouvés. Un manomètre, et, au besoin, une soupape de sûreté, seront placés sur le circuit de refoulement. La pression doit être surveillée attentivement pendant toute l'opération. On observera d'abord une forte augmentation de pression suivie d'une chute qui indique le début de l'action dissolvante de l'acide. Il est indiqué de ne pas prolonger l'opération d'injection au-delà de 45 minutes, d'abord parce que, passé ce délai, l'acide n'a plus guère d'action sur les incrustations, ensuite, parce que l'effet de l'inhibiteur diminue très vite avec le temps, en même temps que l'acide retrouve son pouvoir agressif sur l'acier. Après avoir « cassé la pression », on introduit la cuillère pour agiter vigoureusement la solution et extraire les produits de l'opération. Une acidification est une manœuvre quelque peu délicate, il existe des entreprises spécialisées, munies d'un équipement « ad hoc » et qui sont de précieux auxiliaires des entreprises de forage. (A.MABILLOT, 1971).



II.2.1.5.2. Traitement au chlore :

Le traitement à l'acide n'a guère d'action sur les cultures de bactéries et leurs dépôts gélatineux qui obstruent plus ou moins les voies d'eau. Si l'acide tue radicalement les bactéries, il n'a que peu d'action sur leurs dépôts. Le chlore, qui tue également les bactéries, oxyde et brûle les boues organiques.

Le chlore gazeux est plus efficace, mais son emploi nécessite un équipement spécial que ne possèdent guère que les entreprises importantes ; d'ailleurs, sous cette forme, il est très corrosif, toxique et dangereux à respirer. On peut l'introduire dans le forage, en solution dans

l'eau, par un petit tube en matière plastique, à raison de 15 à 20 kg de chlore, mis en place lentement pendant une période de 10 à 12 heures, s'il s'agit d'un ouvrage important.

Il n'est pas nécessaire pour cela de sortir la pompe d'exploitation, mais l'extrémité du tube en matière plastique doit être placée de telle sorte que le jet de solution chlorée ne vienne directement en contact avec la pompe, le tubage ou la crépine, mais débouche dans l'eau contenue dans le forage. Dès que la solution de chlore aura été introduite, il faudra injecter un important volume d'eau pour faire pénétrer le gaz dans la formation. Il faut prévoir un volume d'eaux 50 ou 100 fois plus grandes que celui de l'eau normalement présente dans l'ouvrage.

Si l'on a démonté la pompe d'exploitation, il y aura lieu, après avoir distribué la quantité de chlore nécessaire, d'introduire une cuillère et d'agiter l'eau chlorée contenue dans le forage, en procédant comme pour le traitement à l'acide. Dans le cas contraire, on pourra utiliser la pompe en circuit fermé, en renvoyant l'eau dans le forage afin de brasser tout le liquide qui s'y trouve.

II.2.1.5.3. Traitement par Phosphatage :

Le traitement par les phosphates de sodium est peut-être le plus important de tous les traitements, car il s'applique avec succès à des colmatages d'origine variée, mais à la condition que le type de phosphate soit adapté au cas à traiter. En effet, des propriétés différentes de complexation, de séquestration, de solubilisation, de dispersion caractérisent certains types de phosphates, dont la variété est grande puisqu'on utilise des ortho-phosphates mono-, di- ou tri-sodique, des pyro-phosphates di- ou tétra-sodiques, des tripolyphosphates dont le plus connu est penta-sodique, des polyphosphates à chaînes courtes tels que le tétrapolyphosphate et le pentapolyphosphate, et ceux à chaînes longues tels que l'héxaméthaphosphate. Chacun de ces produits n'est stable qu'entre certaines limites de pH, et tend à s'hydrolyser au-delà.

Lorsque le colmatage est dû à des particules fines argileuses, les phosphates qui ont un fort pouvoir dispersant peuvent être efficaces, mais encore faut-il que les argiles soient calciques pour que la dispersion par un produit sodique soit efficace. On associe souvent un phosphate dispersant à un phosphate complexant, et différents produits sont ainsi commercialisés sous le nom de Calgon (USA) ou de GilTex (France). Il faut connaître la nature de l'argile, pour connaître le pH auquel elle disperse ou floccule, mais c'est surtout l'ion adsorbé, Na ou Ca, qu'il importe de connaître. Comme on ne dispose généralement pas de telles analyses d'argile, il a été expérimenté que lorsque Ca est prédominant dans l'eau supposée en équilibre chimique avec le milieu, la défloculation réussit tandis qu'on n'obtient pas d'amélioration lorsque Na prédomine. Lorsqu'on ne dispose pas d'analyses d'eau, une détermination sur place des pH, Eh, TH, TA, TAC et des teneurs en Cl⁻, CO₂ - peut se faire, et on a ainsi pratiquement tous les éléments principaux de l'analyse.

Si $r_{CO_3H} < r_{Cl}$ et $r_{(Ca+Mg)} > r_{Na}$, le traitement par les polyphosphates de sodium pourra donner des résultats. Dans le cas contraire, le traitement sera plutôt à faire par acide chlorhydrique. (R. DEGALLIER, 1985).

II.2.1.5.4. Traitement aux polyphosphates :

Les polyphosphates peuvent aussi être utilisés pour ramollir et même dissoudre des incrustations carbonatées. Une dose de 2 mg/L de métaphosphate est suffisante pour maintenir en solution des quantités de carbonates et bicarbonates de Ca très au-dessus des teneurs usuelles des eaux naturelles. Cette dose est suffisante pour inhiber tout dépôt, et conforme aux normes de l'O.M.S. pour l'eau de boisson. (R.DEGALLIER, 1985).

Très répandu en forages d'eau, ce procédé permet de dissocier les oxydes de fer et de manganèse, et d'éliminer les dépôts d'argile ou de limon. Il est absolument non toxique et très facile à pratiquer. Le dosage peut être le suivant. 2 à 4 kg de produit pour 100 litres de l'eau contenue dans le forage. On aura intérêt à ajouter à cette quantité 120 à 150 grammes d'hypochlorite de chaux afin de détruire, du même coup, les bactéries et leurs boues. Il sera bon de demander conseil au fournisseur du produit, en lui indiquant, si possible, les résultats de l'analyse opérée sur des échantillons recueillis, sur la pompe ou sur les tubes. A titre indicatif, on trouve :

- ▶ Hexamétaphosphate de sodium ;
- ▶ Tripolyphosphate de sodium,
- ▶ Pyrophosphate tétrasodique : etc.
- ▶ Orthophosphate de sodium (mono, di, ou tri sodique) ;
- ▶ Polyphosphate de sodium (pyro, tripoly, tétra, méta) ; etc.

La méthode est la même pour tous les polyphosphates. Le produit, placé dans un panier métallique ou un sac en toile, est suspendu dans l'eau d'un bac. La dissolution, par ce moyen, est plus rapide qu'en jetant directement le produit dans le bac. La solution est ensuite injectée sous forte pression en évitant la production de mousse.

II.2.1.5.5. Traitement au CO₂ : Procédé AQUAREGENERATION (effet chimique, bactéricide et physique).



Figure II.12 mise en œuvre de CO₂.
(Carrefour, janvier 2012).

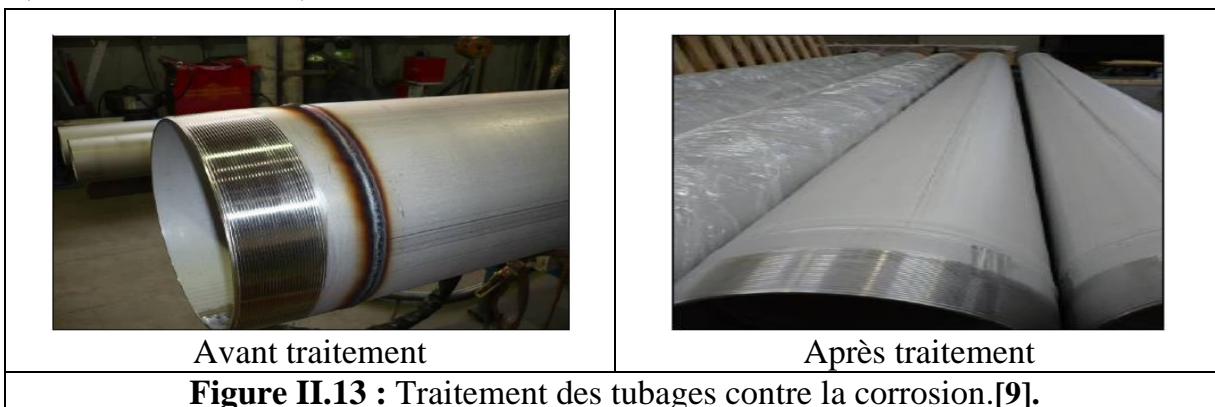
II.2.2. Les techniques contre la Corrosion :

Généralement, les techniques contre la corrosion sont des techniques de rénovation mais il y a des techniques de protection contre ce phénomène puisque souvent les équipements de forage d'eau s'endommagent ou impossible de les traiter c'est pour ça on mis en oeuvre des procédés pour protéger ses équipements contre ce phénomène (mesures préventives).

1) Protection par isolation :

Dans l'équipement tubulaire d'un ouvrage, on trouve toujours, au moins deux métaux différents. Le casing sera toujours en acier, la crépine et son tube d'extension seront, soit en acier différent, soit en un alliage cuivreux. On peut être certain que le milieu -eau ou terrain- sera, si peu que ce soit, corrosif.

On va voir que la corrosion électrochimique est d'autant plus intense que les deux métaux différents sont placés plus près l'un de l'autre. L'effet est maximum s'ils sont directement en contact, voire même soudés. Par contre, si on peut augmenter la résistance chimique entre les deux métaux, on réduira d'autant l'importance de la corrosion. Il vient à l'esprit l'idée d'interposer entre eux des joints neutres en caoutchouc ou en matière plastique. En réalité, cette protection, très difficile à réaliser à cause des raccords filetés, est illusoire parce que le courant galvanique passe quand même, bien que sensiblement atténué, entre les deux métaux. On ne peut donc attendre une amélioration importante de l'application de ce procédé. (A.MABILLOT, 1971).



2) Protection passive par revêtements :

Puisque la corrosion des métaux, quelle qu'en soit la cause, affecte toujours en premier lieu leur surface, on songe aussitôt à recouvrir cette surface de matières éminemment résistantes à la corrosion, c'est-à-dire : appliquer sur toute l'étendue vulnérable -et non plus seulement aux points de contact- un enduit isolant électriquement et chimiquement.

Quand il s'agit de pièces métalliques plongées dans un milieu liquide agressif, mais non exposés à des frottements et pouvant être visités et, à nouveau, traités, l'emploi de peintures bitumineuses très étudiées constitue une solution valable. Ce n'est absolument pas le cas pour les crépines de forage. Certains constructeurs appliquent sur le métal de leurs crépines un revêtement plastique -en polyéthylène, par exemple. Quel que soit le soin avec lequel cet

enrobage est appliqué, quelle que soit l'épaisseur de la couche, on doit craindre que les frottements auxquels la crépine est exposée pendant son transport, son assemblage, sa mise en place, et, en définitive, l'érosion qu'elle subit au moment du développement et de l'exploitation, aboutissent à des éraflures ou des destructions ponctuelles plus ou moins importantes. En ces points, le métal est mis à nu.

C'est le début de la corrosion, laquelle est d'autant plus profonde que la surface dénudée est plus petite. Le mal est d'autant plus insidieux et dangereux qu'il ne se manifeste que beaucoup plus tard, quand on ne peut déjà plus y porter remède. Ce raisonnement est également valable pour les crépines constituées par des anneaux en matières plastiques empilés autour d'un tube central lanterné et « plastifié ».

Il en est de même pour celles comportant un manchon de gravier collé à chaud sur un support également lanterné et enrobé de matière plastique. Dans les deux cas, l'intérieur du tube est exposé aux frottements des outils de développement : cuillères, pistons, jets. Etc.

La protection est enlevée, même sur de faibles surfaces et la corrosion est inévitable. Plus sérieuse apparaît la protection par galvanisation (enrobage de zinc). S'il ne s'agissait que de corrosion chimique, le procédé serait excellent, car la dureté de ce revêtement et l'adhérence parfaite qu'on peut lui donner sur le métal support le classent nettement au-dessus de la méthode précédente. Cependant, en cas de corrosion électrochimique, le zinc amorce un important effet « pile » et sera vite détruit puisqu'il vient presque en tête de la série galvanique.

La suite est facile à prévoir. On ne peut donc pratiquement retenir l'application de revêtements comme solution valable pour prolonger la vie d'une crépine de forage installée dans un milieu plus ou moins agressif.

3) Protection cathodique :

Nous avons vu que la corrosion se produisait aux points « anodiques » d'où partent les ions du métal attaqué. Si on pouvait inverser la polarité du métal en cause, et faire de toute sa surface une « cathode », on aurait, du même coup, empêché sa corrosion. Pour donner au procédé -très efficace lorsqu'il s'agit de corrosion électrochimique- le maximum de chances de succès, il faut assurer une parfaite liaison électrique de tous les éléments à protéger (à l'origine anodes).

Dans des cas, forages, tous les éléments de la colonne de captage : crépine et tube d'extension, doivent être, non seulement vissés, mais encore, éclissés par de petites plaquettes soudées. Par contre, cet ensemble électriquement homogène, devra être électriquement isolé du casing par des joints isolants.

Ces précautions étant prises, on raccordera par un fil électrique isolé, la crépine à protéger à des métaux plus « négatifs » que celui dont elle est faite, c'est-à-dire placés avant lui dans la « série galvanique ». Pour que l'action soit plus intense, on choisira comme anode les premiers éléments de cette série. S'il s'agit d'une crépine en acier, le métal « piège » pourra être le zinc, ou, mieux encore, le magnésium. A ce moment, la crépine qui était anode, devient cathode et c'est le métal annexe (zinc ou magnésium) qui sera rongé à sa place. Tant que cette anode artificielle subsistera, la protection sera assurée. Il faut donc qu'elle ait une

masse suffisante pour durer plus longtemps. Les spécialistes de ce système savent calculer les dimensions des Anodes, leur nombre, leur position dans le terrain ou à l'intérieur de la crépine à protéger. Laissons-leur le soin de définir les caractéristiques des éléments de protection, notre propos était seulement d'indiquer ici l'existence et le principe de l'opération.

Série (ou échelle) galvanique :

On peut dresser une liste des métaux dans l'ordre de leur tendance à la corrosion (ou de leur aptitude à la protection contre la corrosion). La liste ci-dessous est dite série galvanique. Le premier métal de cette liste est celui qui est le plus vulnérable, on dit qu'il est le plus actif. Le dernier est le moins susceptible d'être attaqué par la corrosion, c'est celui qui résiste le mieux, on dit qu'il est passif. Le premier est anode par rapport à tous les autres, qui sont cathodes par rapport à lui.

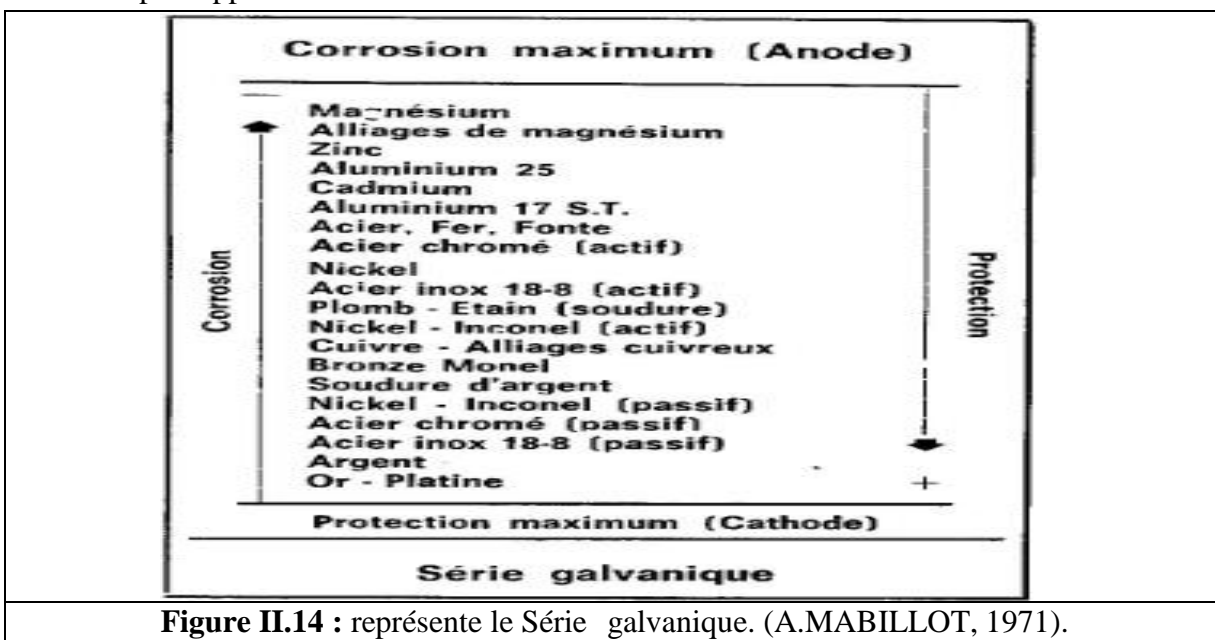


Figure II.14 : représente le Série galvanique. (A.MABILLOT, 1971).

De même, un métal quelconque de cette liste est anode par rapport à tous ceux qui le suivent, et cathode par rapport à tous ceux qui le précèdent. Mais il y a plus : la corrosion sera d'autant plus intense que les deux métaux sont placés plus loin l'un de l'autre dans la série galvanique. Ainsi, le zinc se corrodera plus vite s'il est couplé avec le cuivre que s'il était associé à l'acier.

La série galvanique est également applicable à la corrosion chimique pure, c'est-à-dire dans le cas où un métal unique se trouve placé dans un milieu agressif. L'acier est plus « actif » et se corrodera plus vite que le cuivre. On voit bien l'intérêt de cette « série galvanique » pour le choix du métal à employer pour la construction d'une crépine de forage qui est si exposée à la corrosion.

Nous reviendrons plus loin sur les conditions du choix du métal, mais, ainsi que nous l'avons déjà indiqué pour l'oxydation de notre plaque de fer dans la pile. Il faut signaler que l'oxygène peut avoir un effet de retard dans le phénomène de corrosion car il peut s'accrocher

sous forme d'une fine pellicule à la surface de certains métaux, comme l'acier inoxydable. Ce film d'oxygène protège l'acier contre les attaques chimiques directes ou contre la corrosion électrochimique car. Par isolement électrique, il ralentit le passage du courant entre les deux pôles de la pile. Pour cette raison, l'acier inoxydable est devenu passif. (A.MABILLOT, 1971).

4) Réduction la vitesse de passage de l'eau à travers la crépine :

Il ne s'agit pas d'une cause de la corrosion, mais il existe une relation entre la vitesse de circulation à travers les ouvertures de la crépine et l'accélération de la corrosion provoquée par l'une des causes déjà énoncées. Si la vitesse est faible, la corrosion tend à s'uniformiser, les attaques par piqûres qui auraient pu apparaître dans une. Eau stagnante (pompe arrêtée) se transforme en une corrosion de plus larges surfaces, moins dangereuse. Par contre, si la vitesse est trop grande, le film protecteur qui aurait pu apparaître sur la surface métallique et dont nous avons précédemment parlé sera détruit par le courant hydraulique trop rapide, il en résultera une accélération de la corrosion.

On peut également penser par une grande vitesse de circulation du fluide corrosif, les agents chimiques ou électrochimiques se trouvent plus rapidement renouvelés d'où une intensification de la corrosion.

Bien sûr. Ce ne sont là que des hypothèses, mais il est prouvé, par de très nombreuses observations effectuées principalement aux U.S.A., qu'une faible vitesse d'entrée de l'eau dans les ouvertures d'une crépine tend à réduire l'attaque corrosive sur cette crépine. C'est pourquoi, la vitesse optimum à adopter pour le calcul d'une crépine de forage d'eau semble devoir être : 3 centimètres par seconde. (A.MABILLOT, 1971).

II.3.Les techniques de transformation (rénovation) :

Généralement, les techniques de transformation sont des techniques de traitement contre la corrosion c'est à dire principe de rénovation partielle ou totale des équipements de forage, 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 ;
- de modifier l'objectif d'un forage spécifique en condamnant la partie captant par comblement et aménager une nouvelle partie captant dans le tube de soutènement. Ce type de transformation concerne essentiellement les forages pétroliers abandonnés repris pour capter une nappe d'eau moins profonde ;
- de modifier la conception de l'ouvrage pour répondre à la demande de mise en conformité de l'ouvrage. (Ph.Maget, 2002).

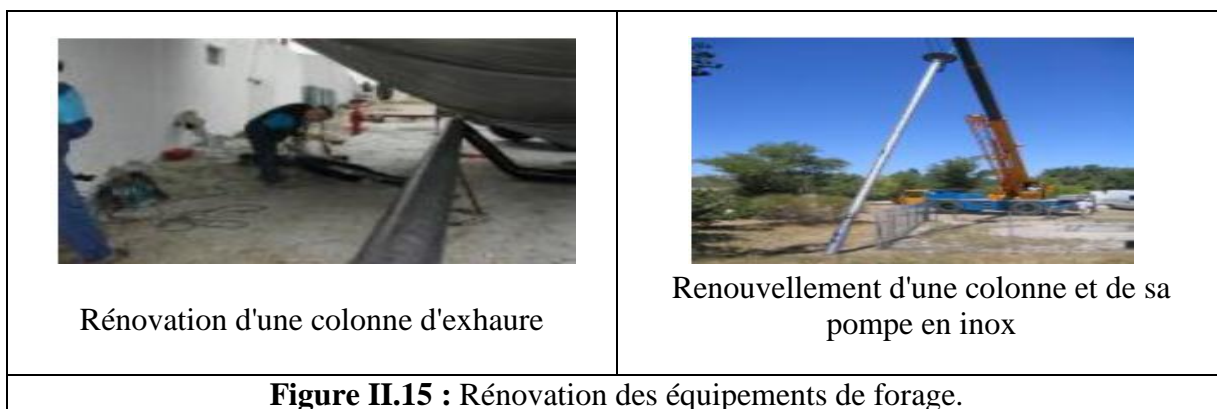
1) Retubage :

Un forage très corrodé et dont sortent des sédiments ne peut être réhabilité que par un retubage partiel ou total. La méthode requise ne peut être déterminée qu'après avoir procédé à une inspection du forage à l'aide d'une caméra ou d'une diaggraphie géophysique afin de

déterminer l'ampleur des dommages ou de la détérioration. Les diagraphies des forages peuvent fournir des indications (température de l'eau, conductivité, débit, résistivité ou état des collerettes) sur la présence éventuelle de trous dans le tubage.

Tous les nouveaux tubes ou crépines installés doivent être faits de matériaux résistants à la corrosion afin d'éviter que le problème ne ressurgisse. Le diamètre du nouveau tubage sera plus petit, et la nouvelle pompe devra être choisie avec ce fait à l'esprit. Les crépines corrodées ne devraient si possible pas être doublées, car la présence de crépines en cercles concentriques crée des turbulences et provoque de l'abrasion. De plus, les fragments de métal corrodé pourraient être aspirés dans le forage durant le pompage.

Bien que cela puisse être extrêmement difficile, il faudrait enlever les crépines corrodées et les remplacer par de nouveaux matériaux résistants à la corrosion. Pour cela, il faudra amener une grosse foreuse sur le site et utiliser sa puissance pour retirer l'ancienne colonne de tubage. Tout massif filtrant perdu peut être soufflé à l'extérieur. Une fois les nouveaux tubes installés, le forage peut être développé de la façon habituelle. Les nouveaux tubes et crépines peuvent être protégés contre la corrosion à l'aide d'électrodes sacrificielles (protection cathodique). Des anodes sacrificielles d'un métal de l'acier dans la série électrochimique (tendance relative à l'oxydation) -comme le magnésium et le zinc- sont installées et se corrodent à la place du métal du tubage, qui est ainsi protégé. Ces systèmes sont utilisés pour protéger les bateaux, les pipelines sous-marins et les installations de pompage mais sont rarement appliqués aux tubes ou aux crépines des forages.



2) Chemisage :

Le chemisage consiste à rénover ou renforcer un tubage par l'installation d'une gaine souple imprégnée d'une résine ou un tubage avec diamètre petite, à l'intérieur du tubage existant. Le mûrissement de la résine est accompli par la circulation d'eau chaude, de vapeur ou par de la lumière. Ces gaines souples dont le matériel varie selon le type de procédé utilisé par les fabricants sont installées par la méthode d'inversion ou de tirage. Il existe plusieurs méthodes de chemisage pour la réhabilitation, par exemple la méthode de "Swage Packer" permet d'effectuer de manière efficace des réparations locales ou des chemisages complets de forage d'eau sans compromettre leur capacité de production. Elle consiste à déformer de manière permanente, à l'aide d'une obturatrice haute pression, un tube en acier inoxydable

recouvert partiellement ou complètement de caoutchouc, le "SWAGE PACKER", à l'intérieur du tubage endommagé.

Une réparation rapide du forage avec du matériel léger.

- Diamètre initial du forage maintenu
- Une étanchéité permanente.
- Une parfaite compatibilité avec les moyens traditionnels de cimentation.



Figure II.16 : représente l'efficacité de recnimesage. [6].

A-Rechimesage partiel : ce type de rechimesage est sauvant applicable dans la réhabilitation des forages car son dernier détériorée partiellement à cause de changement de type de terrain (coupe hydrogéologique). Les étapes de ce type de rechemisage à l'aide de l'obturateur à haute Pression sont montrées dans la figure II.17.

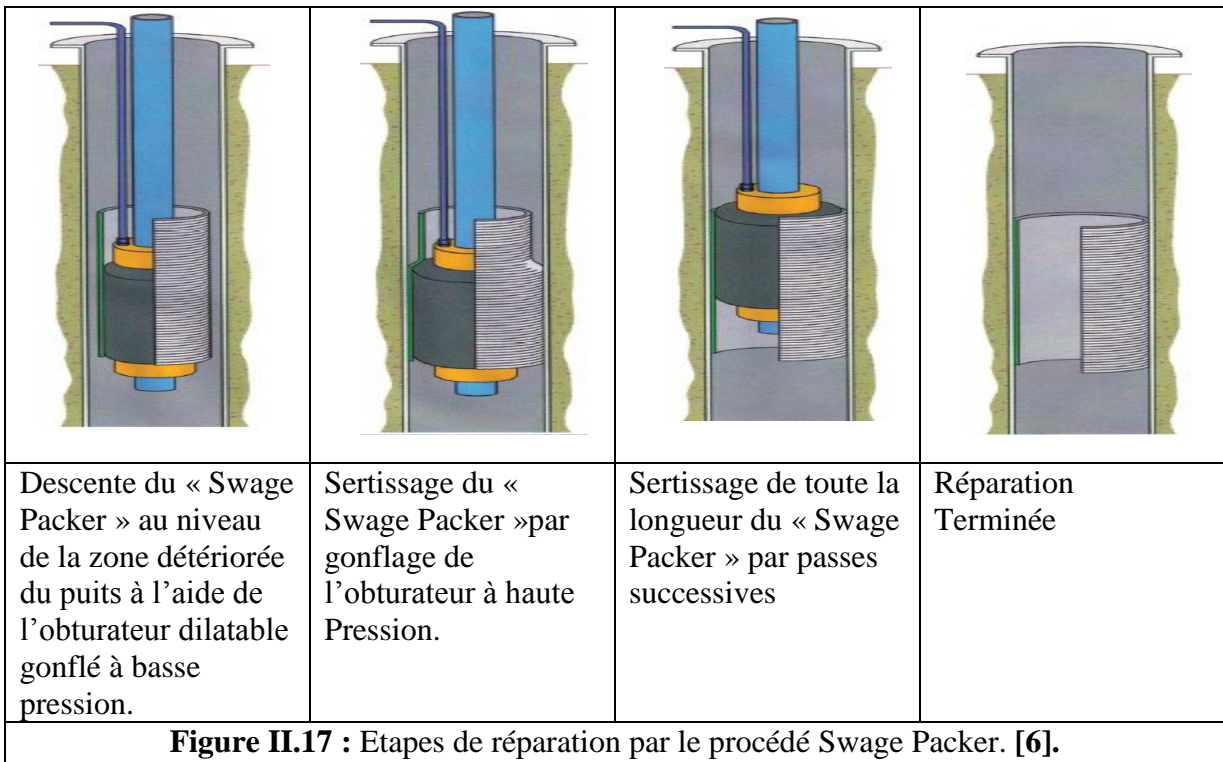
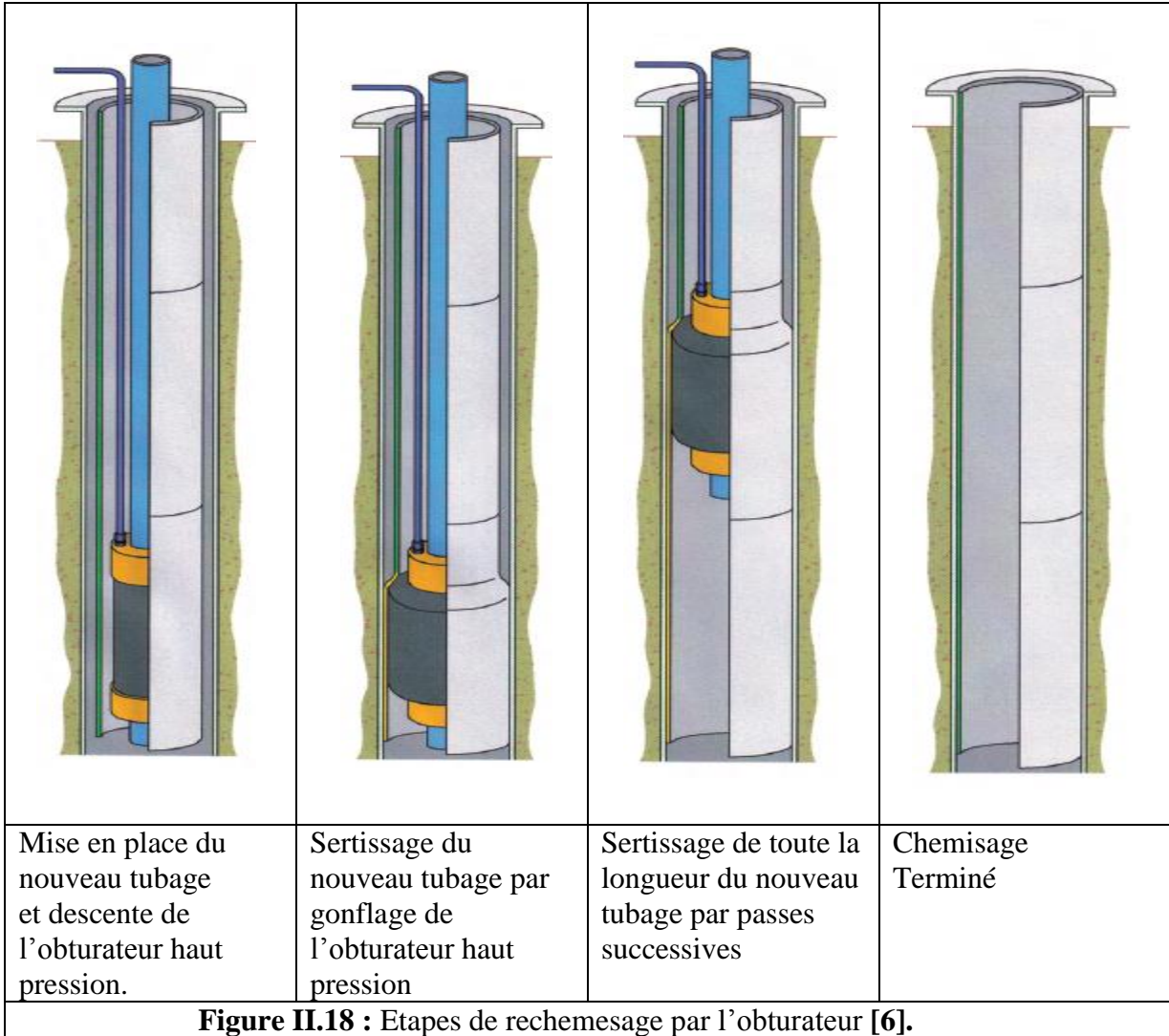
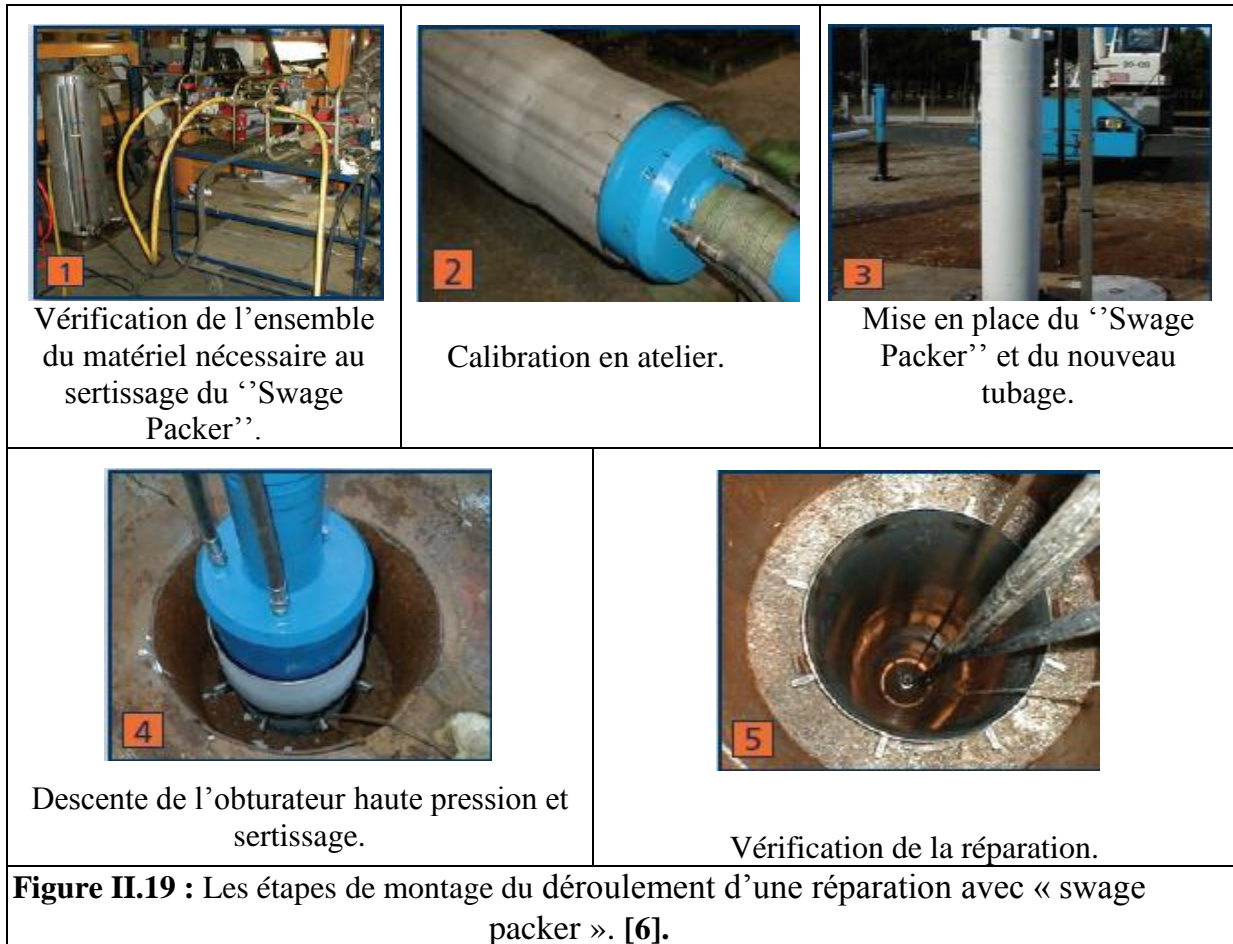


Figure II.17 : Etapes de réparation par le procédé Swage Packer. [6].

B-Rechimesage Total : a le même principe que le précédent, mais seulement dans ce cas, la rechemisage de tubage est fait totalement à cause la détérioration presque totale de tubage. Les étapes de ce type de rechemisage à l'aide de l'obturateur à haute Pression sont montrées par la figure II.18.





3) doublage des crépines :

En cas d'usure ou de rupture des crépines, les techniques ci-dessus ne suppriment pas la cause des difficultés, et doivent généralement être complétées par un doublage des crépines, tenant compte de la granulométrie des particules à retenir, avec un second massif de graviers entre les deux crépines. (R.DEGALLIER, 1985).

Conclusion :

Les méthodes de restauration des forages sont semblables à celles utilisées pour le développement, sauf que les incrustations doivent être dissoutes et éliminées. Les techniques d'élimination des dépôts et des incrustations qui colmatent les orifices comprennent les procédés mécanique, l'injection d'eau sous pression, le pompage par air lift, la technique d'air burst et la dispersion à l'aide de produits chimiques. Une réhabilitation régulière peut permettre d'éliminer les dépôts avant qu'ils ne durcissent. Les techniques qui peuvent traiter les équipements de forage ayant des traces de corrosion sont des techniques de protection, sinon rénovation ou renforcement avec d'autre équipement à moins dimensions, mais ce dernier si c'est possible.

Chapitre III :

Méthodologie de Réhabilitation

III.1.Introduction :

La réhabilitation désigne réparer un forage dont la productivité est faible ou a cessé en raison d'un manque de surveillance et d'entretien de la pompe et de la structure du forage. On va voir dans ce chapitre les motifs de réhabilitation et la méthodologie à suivre pour la faire, avec détail de chaque étape.(résume par annexe 1).

III.2.Quand réhabiliter un forage d'eau :

Tous les forages qui existent devraient être inspectés pour déterminer s'il serait possible de les réhabiliter, Il se peut qu'il n'y ait pas de besoins supplémentaires en eau, mais comme les forages offrent un accès aux eaux souterraines, ils peuvent servir d'ouvrages d'observation pour surveiller le niveau local de l'eau. Mais il y a des symptômes qui indiquent le besoin de réhabilitation comme cité ci-dessous.

A- Réduction de la capacité spécifique :

Bien rares sont les forages qui, après une certaine période d'utilisation, et, aussi, souvent, après une interruption prolongée d'exploitation, produisent le même débit, pour le même rabattement que celui qui a été obtenu aux essais. La capacité spécifique se réduit de plus en plus avec le temps. Cependant, il arrive que, pendant les premiers jours de fonctionnement, on enregistre d'abord une légère amélioration des performances de l'ouvrage. Elle s'explique par le « nettoyage » des canalicules amenant l'eau vers le forage à travers la formation aquifère.

Il se produit, en somme, au cours de cette brève période, un parachèvement naturel du développement. Si, on traçait alors une nouvelle courbe des absorptions en fonction du temps, elle se situerait au-dessous de celles qui ont été tracées au cours de l'opération de développement. De même, si on effectuait une mesure de perméabilité par la méthode (appareil) de BRILLANT, on verrait que le terrain est devenu plus perméable pendant cette courte période d'auto-développement.

B - Venue de sable :

Après une période, souvent assez longue, de fonctionnement tout à fait normal, on constate une brusque, mais très brève augmentation de débit, accompagnée, ou immédiatement suivie d'une venue de sable. Le sable afflue alors de plus en plus au pompage, pendant que le débit décroît progressivement. L'introduction d'une sonde dans l'ouvrage montrerait que la crépine est remplie de matériaux, souvent grossiers. Il s'agit, dans ce cas, d'une destruction, en un ou plusieurs points, du métal de la crépine ou des tubes de captage.



Figure III.01 : Aspect d'eau avant la réhabilitation. [1]

Autre symptômes : C'est le point de départ de réhabilitation, 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. (Ph.Maget, 2002).

Les visites régulières, même si, pendant quelque temps, aucun indice d'obstruction n'a été décelé, permettent au spécialiste d'intervenir dès qu'un début de colmatage est observé, et de prendre immédiatement les mesures nécessaires. Cependant, il faut bien le dire, on néglige d'effectuer ces opérations systématiques de contrôle.

On n'intervient le plus souvent qu'au moment où on constate une réduction massive de la capacité spécifique, ou bien, lorsque le cône de dépression s'est tellement creusé que la pompe se désamorce.

Avant d'effectuer une réhabilitation, il est conseillé de recueillir des échantillons et d'analyser les eaux souterraines locales (si possible) afin de s'assurer qu'elles ne sont pas trop chimiquement agressives.

III.3. Les critères de réhabilitation :

Les forages concernent les trois types de contexte hydrogéologiques mentionnés : nappe libre, nappe unique captive et nappes superposées. Les principales caractéristiques qui s'interviennent sont les suivantes :

1. En ce qui concerne la colonne dans les couches, 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.
- 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. (Ph.Maget, 2002).

2. En ce qui concerne la partie captant :

- les crépines (ou tubes lanternes) 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. (Ph.Maget, 2002).

III.4.Méthodologies de réhabilitation :

Le processus de réhabilitation de base devrait comprendre les étapes principales suivantes, dans cet ordre :

- + Collecte d'archives et d'informations (des services des eaux, des entreprises de forage, etc.) sur le dimensionnement du forage ;
- + Réparation mécanique ;
- + Examen rapide ;
- + Auscultation à l'aide d'une caméra ;
- + Diagnostic du forage ;
- + Décision et Choix de technique de réhabilitation ;
- + Traitement de forage ;
- + Stérilisation de forage ;
- + Vérification et test par paliers de débit ;

III.4.1. Collecte d'archives et d'informations :

Avant de demander une inspection par caméra vidéo, il convient d'essayer de trouver des informations sur la conception et la construction du forage, car cela pourrait permettre de gagner beaucoup de temps. Cependant, dans certaines régions, les archives de la conception des forages seront difficiles à trouver. Elle renseigne sur les caractéristiques techniques du forage, sur l'historique de sa construction et sur la manière dont il a été exploité :

-vérification de la fiche de forage : date de réalisation, contexte géologique, technique de forage, problèmes lors de la formation, plan de captage, nature et positionnement du massif filtrant, technique de développement, résultats des essais de pompage et des analyses d'eau ;

-informations générales des opérateurs et des usagers : profondeur d'installation de la pompe, débits et horaires de pompage, variations des performances du forage et de la qualité de l'eau pompée (incluant le goût, l'odeur et la couleur) ;

- en cas d'abandon : recherche des causes et de la date d'abandon.

1. La reconnaissance hydrogéologique :

La reconnaissance hydrogéologique dans une région encore inexploitée consiste à établir la coupe géologique, à y détecter les couches aquifères, leur profondeur, et les caractéristiques probables de leurs nappes d'après Les caractéristiques régionales : qualité, pression, température d'après le degré géothermique, et la recharge d'après le climat.

L'inventaire est le stade suivant quand des puits existent déjà dans des nappes voisines ou dans la nappe qu'on se propose de capter. Des données plus précises seront obtenues sur les débits, rabattements, niveaux de la nappe, transmissivités, profondeurs, diamètres, types et qualité de tubages, crépines, pompes et surtout sur la qualité de l'eau, par analyses de laboratoire et sur place. On observera aussi dans l'eau des teneurs en matières en suspension telles que sable, argile, ou produits de colmatage ou de corrosion.

On pourra à ce moment dresser l'avant-projet d'une coupe technique répondant aux objectifs de production que l'on se donne, et aux impératifs de diamètre et de profondeur de pompe, de tubage et d'avant-puits ou de chambre de pompage. (R.DEGALLIER, 1985).

L'examen périodique et systématique des normes de pompage -capacité spécifique, consommation d'énergie- ainsi que des analyses physiques et chimiques de l'eau pompée, constituent le meilleur moyen d'information sur « l'état de santé » du matériel souterrain et, éventuellement, sur la nature et l'étendue du mal qui le guette.

Ces données ne sont pas toujours faciles à obtenir, mais un premier examen rapide du forage permet de compléter et de vérifier ces informations préliminaires.

III.4.2. Réparation mécanique :

Afin de les inspecter et de les réparer ou dès les remplacements des équipements de forage, L'enlèvement des pompes et les tuyaux d'exhaure des forages plus profonds peut requérir un tripode et un véhicule équipé d'un treuil. Dans la mesure du possible, un forage devrait être inspecté par caméra vidéo après que la pompe a été retirée.



Figure III.02 Réparation mécanique. (O. Dureau, 2007).

III.4.3. Examen rapide :

De nombreux forages sont désaffectés car un diffus simple par exemple les pompes sont en panne ou en raison d'un manque de compétences, ce problème peut être relativement facile à résoudre : il suffit d'un set d'outils classiques pour démonter la poignée de la pompe, la chaîne, les tuyaux d'exhaure, les tiges et le piston, donc on a

plusieurs éléments que doivent être rapidement vérifiés :

- ▶ état de l'équipement et profondeur d'installation de la pompe ;
- ▶ qualité de l'eau :
- ▶ turbidité,
- ▶ contamination fécale,
- ▶ conductivité,
- ▶ goût, odeur, couleur,
- ▶ présence de sédiments (test du seau, venu de sable) ;
- ▶ analyse du forage :
- ▶ mesure du niveau statique,
- ▶ mesure de la profondeur du forage,
- ▶ estimation des performances (débit et niveau dynamique durant le pompage) ;
- ▶ état des aménagements de surface.

Ces informations de terrain et leur comparaison avec les données lors de la réalisation du forage permettent un diagnostic initial rapide de l'état du forage et des actions à entreprendre.

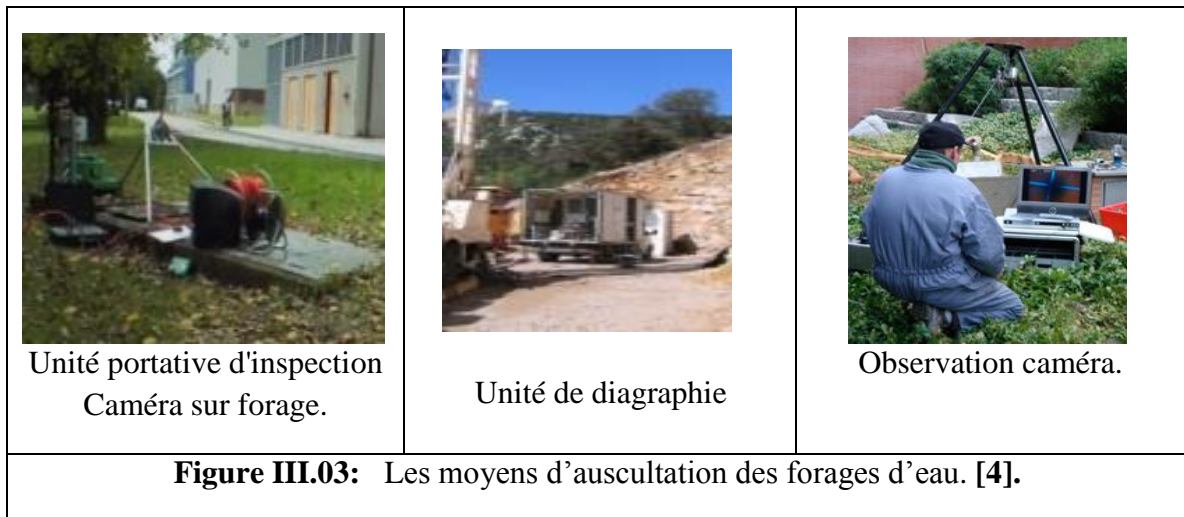
III.4.4. Auscultation à l'aide d'une caméra vidéo :

En général, l'auscultation peut comprendre une première investigation à l'aide d'une caméra avant la réhabilitation. Une deuxième inspection à l'aide d'une caméra devrait ensuite être effectuée pour vérifier l'efficacité de l'opération de dessalage et se faire une idée plus précise de l'état du forage. Toutes ces inspections devraient être consignées en détail et les vidéos devraient être conservées à des fins de référence future.

Donc les actions les plus importantes dans les premières phases du processus de réhabilitation est celle de l'auscultation. Cette action nous permet :

- D'identifier les défauts et les anomalies de nos forage;
- D'identifier les causes génératrices de ces défauts;
- De prévoir l'évolution de ces causes et leurs conséquences sur l'environnement de l'ouvrage.

Les caméras permettent d'inspecter la totalité d'un forage, de haut en bas, en « temps réel ». Les vues latérales permettent d'observer l'état du tubage ou des crépines à des profondeurs précises, consignées. Avec des informations de cette qualité, il est possible de repérer les problèmes et de planifier la réhabilitation complète d'un forage. Les détails de la construction peuvent être observés directement et comparés avec le log de forage original s'il est accessible. Une caméra permet d'inspecter les objets et les débris tombés dans un trou et d'évaluer s'il est possible de les éliminer. Les cascades et, dans une certaine mesure, la qualité de l'eau (précipités chimiques, turbidité) peuvent être observées sur un écran de télévision.



Il existe aujourd'hui sur le marché des systèmes de caméra vidéo très sophistiqués. Conçus pour entrer facilement dans un forage, les meilleurs modèles sont entièrement submersibles et comprennent des câbles indiquant la profondeur, accompagnés d'un treuil à moteur ou manuel, ou un enregistrement automatique de la profondeur. De nombreux modèles ont une lampe intégrée, et permettent le pivotement horizontal et l'inclinaison verticale sous différents angles, ce qui signifie qu'il est possible d'avoir une vue claire du fond et des côtés du forage. Les écrans sont généralement fournis avec la caméra ; un enregistreur vidéo peut être en option.

Si l'eau d'un forage est très trouble, la rétrodiffusion du système d'éclairage risque de brouiller l'image. Néanmoins, ce type de système est un outil précieux lorsqu'un programme de réhabilitation est envisagé.

III.4.5. Diagnostic du forage :

En général, le diagnostic est la détection des phénomènes qui touchent l'ouvrage et proposer la solution la plus favorable à l'aide des archières et les symptômes qui provoquent ce phénomène.

D'un point de vue mécanique, le diagnostic et la solution efficace à un problème reposent sur une connaissance approfondie des caractéristiques de l'équipement et des particularités reliées à l'installation, au fonctionnement, à l'opération, à l'entretien et à la réparation.

En particulier, le diagnostic est détection et l'étude des phénomènes (la source) qui touche l'ouvrage, avec décide la solution le plus défavorable à l'aide des archières et les symptômes et l'auscultation de nous ouvrage qui provoque cette phénomène. Bien sur contexte économique.

La composition de l'eau est la cause principale des incrustations. La nature et le dosage des minéraux et des gaz dissous dans l'eau conditionnent leur tendance à provoquer :

1. Soit la corrosion ;
2. Soit la formation de dépôts incrustants.

Les substances dissoutes dans l'eau souterraine s'équilibrent de manière instable, extrêmement sensible et précaire. Elles y demeurent tant que les conditions de température et de pression restent inchangées. Si ces conditions viennent à être modifiées

par un phénomène extérieur : baisse de pression due au pompage, changement de température par la venue d'eau plus chaude ou plus froide, évaporation partielle, etc., une partie des matériaux se précipite et se dépose sur le support métallique (crépine ou tubage) ou sur le support minéral (grains de la formation naturelle ou du gravier auxiliaire), fissures ou cavernes des terrains karstiques. Le tartre qui se dépose sur les parois d'une bouilloire au moment de l'ébullition (changement de température) donne une idée de la formation des incrustations. (A.MABILLOT, 1971).

Avant d'entreprendre toute intervention sur l'ouvrage, il faut connaître la cause de l'endommagement, mais également d'acquiescer toutes les informations relatives au captage : coupe technique très précise, coupe géologique.

Si, 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 traitée de la réhabilitation ; nous ne développerons.

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. (Ph.Maget, 2002).

III.4.5.1. Le phénomène de (colmatage) incrustation :

La cause la plus commune de la perte de débit est le colmatage des voies d'eau de la crépine et de la formation aquifère adjacente. On désigne sous le nom d'incrustations l'ensemble des matières ou corps étrangers qui se déposent, s'accrochent et s'accumulent sur les pores du terrain et dans la paroi filtrante de la crépine.

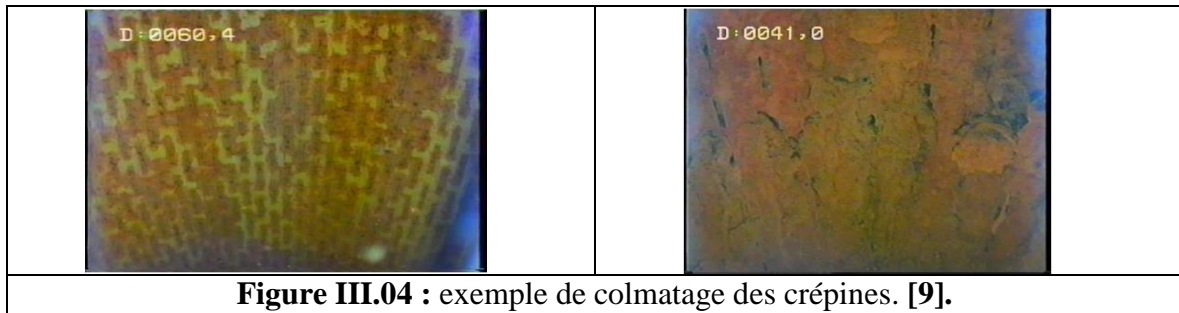


Figure III.04 : exemple de colmatage des crépines. [9].

Rien de commun avec la corrosion qui se traduit par un enlèvement de matière, les incrustations constituent un apport d'éléments indésirables. Cependant, si, pour cette raison, les deux phénomènes ne peuvent être confondus, il arrive qu'ils coexistent sur le même forage. Ainsi, les produits de la corrosion de l'acier (rouille) peuvent se fixer sur la crépine et constituer des incrustations qui l'obstruent finalement, car le volume de la rouille est beaucoup plus important que celui de l'acier dissous par la corrosion.

1. Le colmatage physico-chimique

On constate deux types de colmatage physico-chimique. L'un a pour origine une précipitation de composés carbonatés, l'autre une précipitation de composés ferrugineux. Sous l'action de différents facteurs physiques (vitesse, aération, pression, etc.), l'eau de la nappe est amenée parfois à déposer sur la crépine des concrétions calcaires ou ferrugineuses ou quelquefois les deux en même temps.

Cet entartrage ne se produit pas forcément de manière régulière. Il peut toucher certaines parties du système captant et laisser des passages suffisants pour maintenir un certain débit. La réduction de productivité de l'ouvrage reste néanmoins l'indice caractéristique du colmatage de l'ouvrage. L'existence de jets pénétrants avec force dans le forage et issus de perforations privilégiées de la crépine, bien visibles, est caractéristique de ce type de colmatage. Le phénomène d'entartrage physico-chimique peut être influencé par les conditions d'exploitation, par exemple lorsque l'ouvrage est soumis à de fréquents démarrages et arrêts du pompage. Le colmatage physico-chimique peut être également une conséquence de la corrosion. L'attaque des métaux constitutifs de certaines crépines peut former des concrétions qui obstruent les orifices d'où des colmatages localisés ou généralisés.

Souvent, l'incrustation est un dépôt dur, friable, semblable au tartre stratifié qui se dépose dans les tuyaux d'eau. Parfois, elle présente l'aspect d'une boue molle, pâteuse ou gélatineuse. Classées dans l'ordre du nombre des constatations effectuées, on trouve les plus fréquentes en tête :

- a) Incrustations causées par les carbonates ou les sulfates de chaux ou de magnésie ;
- b) Précipités formés par les composés ferreux ou manganés ;
- c) Obstructions par la boue engendrée par les bactéries ou autres micro-organismes vivants ;
- d) Colmatage constitué par les matériaux fins et solides du terrain, araires, limons, qui s'agglutinent dans les voies d'eau de la crépine et de la formation.

Les incrustations peuvent se développer très rapidement ; c'est ainsi que, par exemple, une précipitation de un milligramme par litre et par jour, de matériaux solides, constatée dans un forage tubé en 12", pompé à 120 m³/h, provoquera un dépôt de 3 kg en 24 heures. A ce taux, tous les vides entre les grains de sable dans un rayon de 15 centimètres autour de la crépine seront complètement bouchés en 7 à 8 mois.

Nous avons vu que l'origine principale des incrustations est la formation de carbonates de chaux et de magnésie. D'autres substances, telles que les silicates d'alumine et les composés ferreux peuvent se trouver mêlées à ce dépôt qui agglomèrent et cimentation les grains de sable au voisinage de la crépine. Les incrustations remplissent les vides la perméabilité de la formation réduite et le flux d'eau se trouve progressivement diminué.

On peut tenter d'expliquer ainsi la formation des premiers précipités. Les carbonates de chaux sont solubles dans l'eau en fonction du gaz carbonique qu'elle contient (CO₂). Or, la quantité limite de gaz carbonique pouvant être dissous dans un volume d'eau donné, varie avec la pression et croît avec celle-ci. Pendant le pompage, le niveau de l'eau dans le terrain est rabattu. Il se produit une dépression d'autant plus grande qu'on se trouve plus près du forage d'exploitation (cône de rabattement ou de dépression). Cette chute de pression libère du gaz carbonique et, par voie de conséquence, précipite une partie des carbonates de chaux contenus dans l'eau et qui vont se fixer dans les pores de la

formation, en proportion d'autant plus forte qu'ils sont plus proches de la crépine. On peut penser qu'il en est de même pour les dépôts des composés chimiques de fer et de manganèse. L'oxyde ferreux hydraté est une boue noire, insoluble, alors que l'oxyde de fer est brun rouge, comme la rouille courante. L'oxyde de manganèse, insoluble, se présente également sous forme d'une substance noire ou brun foncé. Dans les parties asséchées d'une formation aquifère en cours de pompage, à l'intérieur du cône de rabattement, l'air pénètre dans les pores du terrain et oxyde le fer contenu dans la pellicule d'eau de rétention qui enveloppe encore chaque grain de sable ou de gravier. Il en résulte une réduction du volume de stockage de l'eau gravifique (ou disponible), ainsi que de la perméabilité du terrain, d'où une diminution de la capacité spécifique de l'ouvrage. (A.MABILLOT, 1971).

2. Le colmatage bactérien :

Les bactéries «fer» prolifèrent dans l'eau contenant une certaine quantité de fer dissous. On suppose qu'elles se nourrissent de composés carbonés, tels que les bicarbonates et le bioxyde de carbone. La production de boue gélatineuse est le résultat du cycle biologique de ces micro-organismes qui transforment ainsi le fer en oxydes ferreux insolubles. La boue bactériale peut aussi capter et englober d'autres particules insolubles qui augmentent encore le volume des matières obstruant les voies d'eau de la formation et de la crépine.



Figure III.05 : Développement bactérien.

Le colmatage est rarement le fait des argiles et des vases véhiculées par l'eau, sauf si les ouvertures de la crépine sont trop minces, si le forage a été insuffisamment développé, ou bien, encore, si la formation contient une anormale proportion de ces fines particules. La théorie que nous venons d'exposer semble vérifiée par de nombreuses observations ; elle n'est certainement pas la seule valable, mais elle explique pourquoi les incrustations n'affectent pratiquement que la crépine, le fourreau de gravier auxiliaire et la formation adjacente, tandis que les voies d'eau plus éloignées du terrain peuvent en être complètement dépourvues.

Le colmatage bactérien est une ‘maladie’ qui s'est développée assez récemment pour toucher maintenant de nombreux captages, plus particulièrement ceux exploitant des nappes alluviales ou peu profondes. Le phénomène se manifeste par la présence de filaments ou de flocons gélatineux observables dans l'eau pompée. Au niveau de la crépine du captage, les bactéries développent des masses gélatineuses compactes qui obstruent les arrivées d'eau et réduisent d'autant le débit exploitable. Dans la majorité des cas, il s'agit de bactéries du fer et du manganèse, non dangereuses pour la santé humaine, mais très préjudiciables aux canalisations. (O. Dureau, 2007).

3. Conclusion sur l'incrustation :

Les incrustations qui en sont la cause. C'est-à-dire l'ensemble des matières ou corps étrangers qui se déposent, s'accrochent et s'accumulent sur les pores du terrain et de la paroi filtrante de la crépine, peuvent être classées en quatre catégories :

- Incrustations causées par les carbonates ou les sulfates de chaux et de manganésiens
- Précipités formés par des composés ferreux ou manganésiens.
- Obstructions par la boue engendrée par les bactéries ou autres micro-organismes vivants.
- Colmatages constitués par les matériaux fins et solides du terrain argiles, limon, qui s'agglutinent contre les voies d'eau de la crépine et contre la formation aquifère.

III.4.5.2. Le phénomène de corrosion :

Nous avons vu que les symptômes de la corrosion apparaissent, le plus souvent, sous forme d'une brusque, mais brève, augmentation de débit, accompagnée ou immédiatement suivie d'une venue de sable. C'est l'indice certain que la crépine a été partiellement détruite et que des ouvertures ont été pratiquées, en un ou plusieurs points, par la dissolution du métal, provoquée par l'agressivité des eaux.



Figure III.06 : Aspect de l'effet de la corrosion sur l'équipement de forage. [9].

La corrosion est susceptible de toucher toutes les parties métalliques d'un captage de différentes façons et créer des perturbations importantes en exploitation. Les phénomènes physico-chimiques en cause sont complexes : agressivité de l'eau ou des terrains, oxygénation de l'eau ou non, couples électrolytiques, matériaux de natures différentes, etc... ; Les courants telluriques issus peuvent provoquer dans certaines conditions d'importantes corrosions aux tubages acier. La corrosion, lorsqu'elle affecte un captage d'eau souterraine, peut provoquer des désordres extrêmement divers. Une corrosion généralisée par exemple diminue l'épaisseur des équipements et fragilise l'ouvrage en réduisant sa résistance mécanique. Des corrosions localisées provoquent des percements des tubages qui permettent le passage d'éléments extérieurs solides ou liquides. Lorsqu'elle concerne la crépine du captage, la corrosion peut entraîner sa destruction. (O. Dureau, 2007).

III.4.5.2.1. Différentes formes de corrosion : L'examen des éléments corrodés extraits d'un forage permet de distinguer les aspects suivants :

- 1. Corrosion uniforme :** Simple dissolution du métal sur d'assez larges surfaces.
- 2. Corrosion par piqûres :** Attaques localisées sur des points étroits (quelques millimètres carrés). Piqûres profondes, parfois sur toute l'épaisseur (métal percé).
- 3. Corrosion inter granulaire :** Attaques en cuvettes apparaissant surtout sur les crépines en tôle roulée ou en tubes étirés, perforés ou non.
- 4. Corrosion fissurant :** Fissures linéaires plus ou moins ramifiées.

Dans les métaux alliés, les éléments de base seront différemment attaqués selon leur degré de résistance à la corrosion, de sorte que l'on observera soit l'une, soit l'autre des

quatre formes précédentes, soit encore plusieurs d'entre elles simultanément, Par exemple, dans un alliage contenant notamment du cuivre et du zinc, ce dernier métal sera attaqué le premier et l'ensemble sera d'abord poreux, puis fissuré et enfin largement détérioré.

III.4.5.2.1. Type de la corrosion :

La corrosion est due à des phénomènes purement chimiques, ou à une action électrochimique, prenant naissance dans un milieu souterrain, liquide ou solide, présentant certaines caractéristiques que nous allons essayer de définir.

1. Corrosion chimique :

La corrosion chimique, due à la présence des éléments cités ci-dessous et plusieurs autres, peut se produire, même si tout l'équipement tubulaire n'est constitué que d'un seul métal. Si, par exemple, un tube d'acier au carbone se trouve placé dans un terrain salé, les ions fer s'associent avec les ions chlore et donnent du chlorure de fer, les électrons provoquent un dégagement d'hydrogène. Ainsi, des particules superficielles du métal seront détachées et passeront dans le milieu corrosif. L'action aura lieu, alors même qu'il n'y a qu'un seul métal en présence. Elle sera d'autant plus intense que le degré de concentration du milieu corrosif sera plus élevé et selon que le métal sera placé plus haut dans l'échelle galvanique, dont nous parlerons plus loin.

- ✓ Eaux acides : pH faible, < 7.
- ✓ Oxygène dissous : même en très petites quantités, ce qui est fréquent, surtout à faible profondeur.
- ✓ Hydrogène sulfuré, H₂S.
- ✓ Gaz carbonique.
- ✓ Chlorure.
- ✓ Argiles riches en sulfate de calcium (gypse) extrêmement corrosives.

2. Corrosion électrochimique (ou galvanique) :

Si deux métaux de composition différente sont plongés dans un milieu conducteur de courant -électrolyte- (eau salée, par exemple) et s'ils sont reliés entre eux, extérieurement (ou intérieurement) par un conducteur électrique isolé, on obtient une pile génératrice de courant électrique. Une colonne de tubage constituée de deux métaux différents : acier doux et acier inoxydable par exemple, ou bien acier doux et alliage cuivreux, sera rapidement endommagée par effet galvanique, corrodant l'acier doux. Dans l'exemple de la pile, si l'un des métaux est constitué par une plaque d'acier doux et l'autre par un alliage cuivreux : au sein de l'électrolyte, le courant électrique produit ira de l'acier pôle négatif, qui sera l'anode, vers le cuivre qui sera la cathode, pôle positif. L'action de ce courant se traduira par une altération de la surface de la plaque d'acier qui sera rongée et qui va perdre de sa substance. Elle se couvrira de rouille produite par l'oxygène libéré par la dissociation de l'eau.

Le même phénomène libère des atomes d'hydrogène extraits de l'eau. Ces atomes vont se diriger, partie vers la cathode, sur laquelle ils vont former une mince couche protectrice, et partie à la surface de l'électrolyte d'où ils se dégageront sous forme de bulles gazeuses. Si, sur le conducteur isolé qui, extérieurement, réunit les deux plaques, on interpose un galvanomètre, on vérifiera que le courant électrique produit qui va de la cathode à l'anode (c'est-à-dire en sens inverse de celui provoqué au sein de l'électrolyte)

sera d'autant plus intense que l'électrolyte sera plus concentré et d'une nature plus agressive.

L'eau salée, ainsi, est plus corrosive que l'eau douce. Les sels minéraux contenus dans les terrains aquifères sont plus ou moins corrosifs et l'eau qui y circule vers le forage sera chargée de ces sels et deviendra un électrolyte d'autant plus puissant que la nature et le degré de concentration des sels seront plus favorables à la production et à la circulation du courant électrique produit.

Si, par exemple, l'équipement tubulaire d'un forage, casing, crépine et tube d'extension, est constitué d'un même métal : acier au carbone par exemple, la corrosion électrochimique peut cependant se manifester si ce métal est hétérogène, s'il comporte, en certains points, des impuretés, des zones de structures différentes.

Tout se passe en fait, comme s'il s'agissait de deux métaux distincts, bien que l'action corrosive soit, dans ce cas, moins intense. Des couples galvaniques, phénomènes électrochimiques peuvent encore se produire sur un seul métal, même très homogène, lorsque, par exemple, un élément tubulaire traverse des couches de terrain de la nature très différente. On se trouve en présence de ce qu'on appelle une « pile géologique ». Ainsi, un casing traversant d'abord une couche calcaire superficielle bien aérée, puis un banc d'argile, peut donner naissance à une Dilue galvanique. Provoquant la corrosion de la partie contiguë à l'argile qui constitue l'anode, par rapport au tronçon situé dans les calcaires, qui est la cathode. Remarquons tout de suite que si, comme c'est souvent le cas, le casing est cimenté sur toute sa hauteur, le fourreau de ciment. Matériau unique, ralentit ou supprime l'effet de corrosion que nous venons de définir. Ainsi, la cimentation est à conseiller, dans tous les cas. Sur toute la hauteur de la colonne de soutènement. Nous avons, dans notre premier exemple de pile, indiqué que la plaque d'acier, oxydée par les atomes de l'électrolyte. Allait se recouvrir de rouille, oxyde de fer. Si la couche de rouille est continue, dure et recouvre entièrement la surface de la plaque, cette couche protège et isole les couches Intérieures du métal.

La corrosion s'arrêtera parce que le courant est rompu entre les deux plaques. Au bout d'un certain temps, un tube uniformément rouillé est protégé de la corrosion ; mais si. Par exemple, on décidait de remplacer une partie de ce tube par un tronçon neuf, on constaterait que ce tube neuf se corroderait plus vite que son voisin déjà recouvert de rouille. Pour la même raison, la partie fileté d'un tube sera plus vulnérable à la corrosion que le reste du tube, car l'usinage a détruit la peinture d'origine ou la « peau » (légère oxydation) existantes avant l'exécution du filetage.

Dans cette circonstance, la partie usinée qui est l'anode est de petites dimensions par rapport au reste du tube, cathode, ce qui accélère encore la vitesse de destruction du métal dans la zone fileté. Lorsqu'on enrobe de zinc une pièce métallique en acier, par exemple, cette pièce placée dans un électrolyte se trouvera protégée de la corrosion de la manière suivante, Tant que la couche de zinc est continue, aucun contact direct n'existe entre l'acier et l'électrolyte. Il n'y a donc aucun courant et pas de corrosion. Si une autre pièce en acier, non galvanisée, se trouve plongée dans le même électrolyte. Le courant se produit entre l'enrobage de zinc, anode, et la pièce en acier non revêtue, cathode. La couche de zinc va se trouver corrodée et son support ne sera plus protégé. (A.MABILLOT, 1971).

1. Corrosion bactérienne :

La présence de bactéries dans l'eau peut engendrer des attaques des métaux, spécialement du fer et du manganèse. Elles produisent, en rongant les surfaces métalliques, une sorte de boue visqueuse dans laquelle elles prolifèrent. Cette boue renferme les particules métalliques désagrégées et l'action continue en profondeur. Des excroissances se forment dans les ouvertures des crépines qui se trouvent plus ou moins obstruées, alors que, sous ces dépôts, le métal est corrodé.

Le phénomène s'apparente provisoirement à des incrustations, mais, si on enlève ces dépôts, soit par lavage au jet, soit sous l'influence d'un accroissement de vitesse du flux hydraulique de pompage, le métal, mis à nu, présente une section réduite par la corrosion due à l'action des micro-organismes (bactéries). La destruction des crépines en ces endroits en est la conséquence plus ou moins rapide.

2. Conclusion sur la corrosion :

On voit que les causes de corrosion sont nombreuses et variées. Il n'est pas possible de dire qu'un sol, traversé par un forage, n'est pas, si peu que ce soit, corrosif, et, encore bien moins, qu'il ne le deviendra pas dans le temps. Même dans les terrains qui, au moment de l'exécution de l'ouvrages. Ne semblaient pas dangereusement corrosifs, a de nombreuses circonstances extérieures plus ou moins éloignées dans l'espace et dans le temps, superficielles ou souterraines, minérales ou liquides. Déclenchées par la mise en production du forage, peuvent modifier sensiblement, ou complètement, la nature physique ou chimique de certaines couches et rendre agressif le milieu entourant la crépine.

D'autre part, on sait bien au deux forages, Même très proches l'un de l'autre, peuvent se comporter de manière très différente, tant dans les caractéristiques physiques (capacité spécifique, granulométrie, etc.). Que dans la composition chimique de l'eau qu'ils produisent. L'un peut être, plus que l'autre, menacé par la corrosion.

III.4.5.3. Érosion :

L'érosions souterraine est l'action de mise en suspension et d'entraînement des particules les plus fines d'un milieu poreux non consolidé par l'eau percolant dans ce milieu lorsque la vitesse de filtration dépasse un seuil critique, ayant pour effet une augmentation de la perméabilité. C'est l'effet inverse du colmatage.(Schneebeli, 1966).

Une usure des crépines peut avoir lieu par abrasion lorsque la vitesse d'entrée de l'eau est très importante (supérieure à 3 cm/s). Ce phénomène est provoqué par le dimensionnement insuffisant des ouvertures des crépines (non-respect des proportions entre l'ouverture des crépines, granulométrie du gravier filtrant et granulométrie de l'aquifère), une longueur insuffisante de la colonne de captage ou le positionnement incorrect de la pompe dans les crépines (l'aquifère est sollicité essentiellement au droit de la pompe provoquant des vitesses d'eau très élevées ; la pompe heurte les crépines lors du démarrage). (B.Miribel, 2006).

Le tableau suivant résume les différents symptômes, leurs causes et les solutions apportées au niveau d'un forage d'eau

Chapitre III : La Méthodologie de Réhabilitation

Tableau III.01: les symptômes, causes et solutions de quelque évènement qui peut toucher les forages d'eau potable. (Robert Mardini, mars 2012).

Symptôme	Causes	Mesures correctrices
Baisse régionale du niveau de l'eau souterraine	Facteurs régionaux, par ex. mouvements du sol, sécheresse, pompage à grande échelle, déforestation intensive	Abaisser l'orifice d'aspiration Approfondir le forage Réaliser un nouveau forage (plus profond)
Baisse localisée du niveau de l'eau souterraine	Sur pompage Crépines ou massif filtrant bouchés	Vérifier/comparer les données des essais de pompage antérieurs Réduire le débit de pompage Réhabiliter : inspecter les crépines, développer par pistonage pour nettoyer les crépines et le massif filtrant
Modification de la qualité de l'eau (chimique)	Pollution chimique Intrusion d'eau saline Mélange d'aquifères	Analyser l'eau. En cas de danger, cesser la production du forage et réévaluer la situation
Modification de la qualité de l'eau (biologique)	Pollution Changement dans la composition chimique de l'eau	Analyser l'eau. En cas de danger, cesser la production du forage. Si temporaire, dénoyer et
Corrosion / incrustation inhabituelle de l'aménagement de surface du forage	Qualité de l'eau, par ex. carbonate (eau dure), eau acide, Ferro bactéries	Enlever la pompe, inspecter le forage. Réhabiliter
Diminution du débit (niveau de pompage inchangé)	Pompe défectueuse Tuyaux bouchés (incrustations)	Enlever et inspecter la pompe Inspecter les tuyaux ; les remplacer si nécessaire
Bruit ou vibration inhabituels (pompe immergée)	Pompe endommagée / défectueuse	Enlever et inspecter la pompe Inspecter le forage

III.4.5.4. Autres phénomènes qui peuvent toucher l'ouvrage(les équipements de forage) :

1- liés au changement caractéristiques du milieu autour l'ouvrage :

1-A. Le colmatage mécanique :

Il se produit généralement sous l'effet d'une déstabilisation de la formation aquifère dans l'environnement proche du captage et préférentiellement lorsque l'aquifère est de type sableur. Il concerne plus particulièrement les forages ayant fait l'objet de pompages excessifs, même temporaires. Sous l'effet des perturbations hydrauliques provoquées par le pompage, le massif de graviers qui entoure la crépine accumule des particules fines qui s'opposent au passage de l'eau et, en définitive, imperméabilise l'ouvrage autour de lui. L'effet de colmatage mécanique peut également être lié à la corrosion de la crépine de

l'ouvrage. La perforation de celle-ci peut en effet entraîner le transfert partiel du massif de graviers de l'extérieur de la crépine vers l'intérieur et son remplacement par des matériaux constitutifs de la formation, d'où des pertes de charge supplémentaires et une réduction possible du débit. (O. Dureau, 2007).

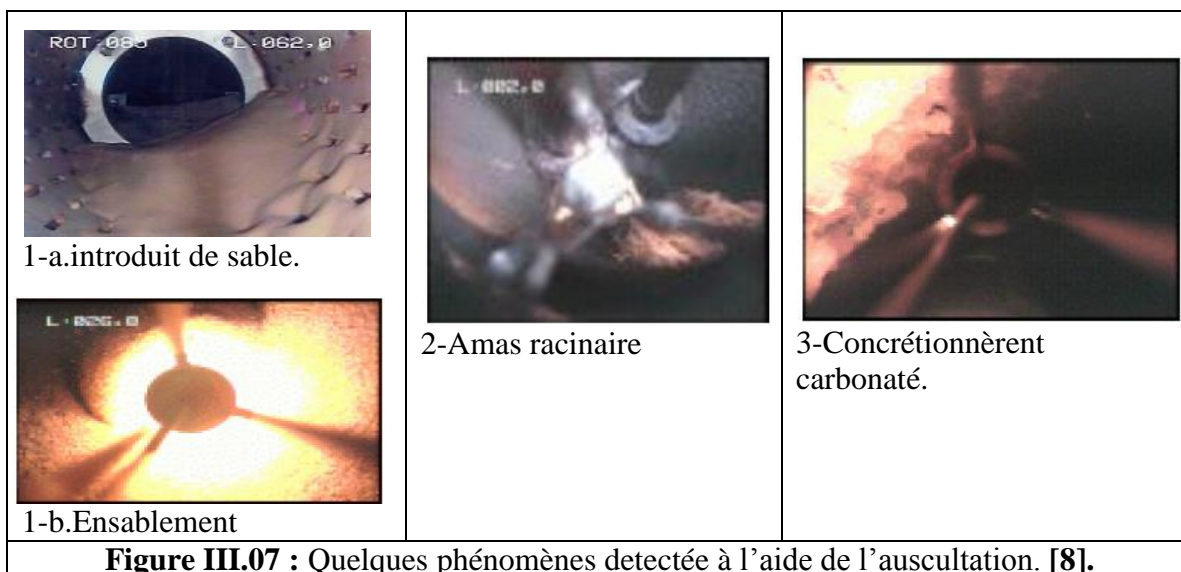


Figure III.07 : Quelques phénomènes détectée à l'aide de l'auscultation. [8].

1-B.L'ensablement : L'ensablement d'un captage d'eau souterraine n'est en réalité que l'effet d'une cause qui a pour origine la corrosion, la surexploitation ou une mauvaise conception de l'ouvrage.

2- liés aux changements brusques de structure autour l'ouvrage :

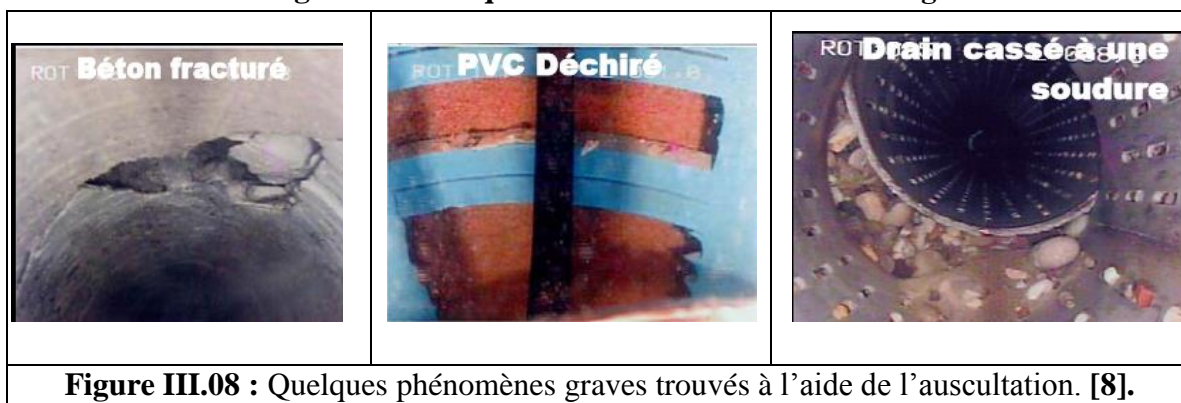


Figure III.08 : Quelques phénomènes graves trouvés à l'aide de l'auscultation. [8].

Ces phénomènes se produisent en générale à cause de déstabilisation du terrain dans l'environnement de l'ouvrage ou suite d'une cause naturelle ou suite de non respect des critères de conception.

III.4.6. Décision et Choix la technique de réhabilitation :

La décision de faire la réhabilitation est liée directement au cout et frais de réhabilitation c'est dire de point de vue économique et dépendra aussi de l'effet de l'évènement qui touche l'ouvrage (l'équipement de forage) mais aussi de l'irréversibilité des phénomènes.

Le choix de la meilleure technique de réhabilitation à utiliser est donc beaucoup plus facile lorsque l'on peut diagnostiquer ou déterminer l'origine de la détérioration de notre forage (tubage).

Les techniques de réhabilitation de forage doivent être choisies sur la base d'un diagnostic préalable fiable. Ainsi il n'est pas suffisant de se contenter d'une simple inspection vidéo qui ne constitue qu'un seul élément d'un diagnostic. [7]

L'ordre dans lequel certaines de ces opérations (diagnostic) sont faites dépend du type de phénomènes (colmatage à combattre, corrosion,...) qui touchent l'ouvrage et choisir la technique de traitement selon le phénomène.

En cas d'ensablement, ce seront les techniques habituelles utilisées lors du développement des puits qui seront appliquées, comprenant alternances de lavage à l'eau claire et de pompage à l'émulseur à l'intérieur des crépines, pistonnage mécanique ou à l'air comprimé, pompage par paliers, et enfin doublage des crépines s'il y a eu rupture.

En cas de colmatage par des particules fines, après lavage à l'eau claire, on alternera les traitements aux polyphosphates avec les opérations au chapitre précédent, avec l'injection d'eau sous forte pression dans les crépines, et avec l'acidification.

Les entartrages et incrustations seront traités par tir à l'explosif, polyphosphatages, brossage et grattage, acidification, avant de nettoyer Le trou et ses environ par pompage à l'émulseur, injection d'eau sous pression et pompage.

En cas de colmatage biologique, L'évacuation des produits de colmatage par brossage, puis traitement à l'acide, doit être fait avant la stérilisation, car les bactéries ne sont plus alors protégées par Leur gangue ferrugineuse. L'injection d'eau sous pression contribuera à laver le massif de graviers des cadavres des bactéries, et les pompages à l'émulseur ou à la pompe feront le nettoyage du trou.

La corrosion est justiciable de traitements semblables, pour enlever les produits de corrosion qui peuvent boucher les crépines, tuer les bactéries qui peuvent être présentes. Si on ne peut régénérer Le métal enlevé par La corrosion, on peut diminuer l'intensité de La corrosion par protection cathodique. (R.DEGALLIER, 1985).

III.4.7. Traitement du forage :

Une fois le programme accepté, les travaux de réhabilitation peuvent être entrepris. Les principaux travaux que l'on peut rencontrer habituellement sont présentés dans le chapitre précédant et la suite de cet des sous-titre.

Une fois qu'un forage est atteint par des problèmes d'incrustation ou de corrosion, il doit être réhabilité ou traité à l'aide de techniques mécaniques, chimiques, ou autres (comme celles utilisées pour le développement) afin qu'il retrouve sa capacité de production perdue, mais il n'existe pas de traitement adapté à chaque forage.

III.4.7.1. Traitement contre l'incrustation (colmatage) :

III.4.7.1.1. Le traitement chimique :

La solution chimique, d'ailleurs, pénétrera d'abord et surtout dans les zones les moins colmatées parce que ce sont les plus perméables. Il faudra avoir recours à plusieurs opérations successives sans être absolument certain de pouvoir retrouver la capacité spécifique initiale, alors que, pris à temps, le mal aurait pu être aisément combattu. On peut d'ailleurs ajouter que, bien souvent, un lessivage exécuté en temps utile, dès le début de la formation des incrustations, permet d'obtenir des conditions d'exploitation meilleures que celles obtenues aux essais. Le traitement chimique s'impose. Il comporte :

- ✓ Le traitement aux acides ;
- ✓ Le traitement par le chlore ;
- ✓ Le traitement aux polyphosphates ;
- ✓ Le traitement mixte ;

En prélevant des échantillons des dépôts formés sur les pompes, les tuyaux d'aspiration, les crépines, et en les analysant, on peut établir la nature, la composition de ces dépôts et en déduire le mode de traitement à appliquer. Par exemple, un acide approprié diminuerait l'importance des dépôts de carbonates, mais serait sans effet sur la silice ou le silicate d'alumine. La présence d'oxyde ferreux et de matières organiques, indice certain de l'action des bactéries, justifierait l'emploi du chlore et des poly phosphates, tandis que le traitement au chlore serait sans effet sur les carbonates de chaux.(A.MABILLOT, 1971).

Ce moyen est utilisé pour les terrains aquifères renfermant des éléments que le produit employé permet d'éliminer en les solubilisant :

1.A l'acide : injecté par gravité ou mieux sous pression en y adjoignant un inhibiteur de corrosion pour protéger les tiges et les tubes, et parfois des agents mouillants pour faciliter l'attaque. La pénétration dans le terrain est améliorée par une succession d'injections à l'acide et à l'eau sous pression. L'acide chlorhydrique permet d'agrandir les passages d'eau en terrain calcaire. Son action est très rapide. Elle peut être répétée en fonction des améliorations constatées. Pompage et injections alternés permettant d'éliminer les impuretés formées d'oxydes de fer ou d'alumine dont les précipités risqueraient de colmater les fissures. Ces impuretés sont maintenues en dissolution en amenant le pH à de faibles valeurs par adjonction d'acide citrique ou lactique (10 gr par litre). La première injection est faite en volume correspondant à celui du forage : les passages sont augmentés en volume pour tenir compte de l'effet de dissolution auquel est soumis le terrain.

L'acidification a une action rapide et il est inutile de laisser la solution en place ; il est préférable d'effectuer un pompage de nettoyage et de renouveler l'opération. Les produits sortants ont à présenter un état acidifiant résiduel aussi faible que possible.

Cependant, des précautions doivent être prises en cas de rejet des produits de nettoyage dans un cours d'eau afin d'éviter des dommages à la faune piscicole. Elles consistent à réduire les teneurs en chlorures par un étalement des temps de pompage ou à injecter une solution de soude dans la conduite d'exhaure pour régler le pH sur celui de la rivière.

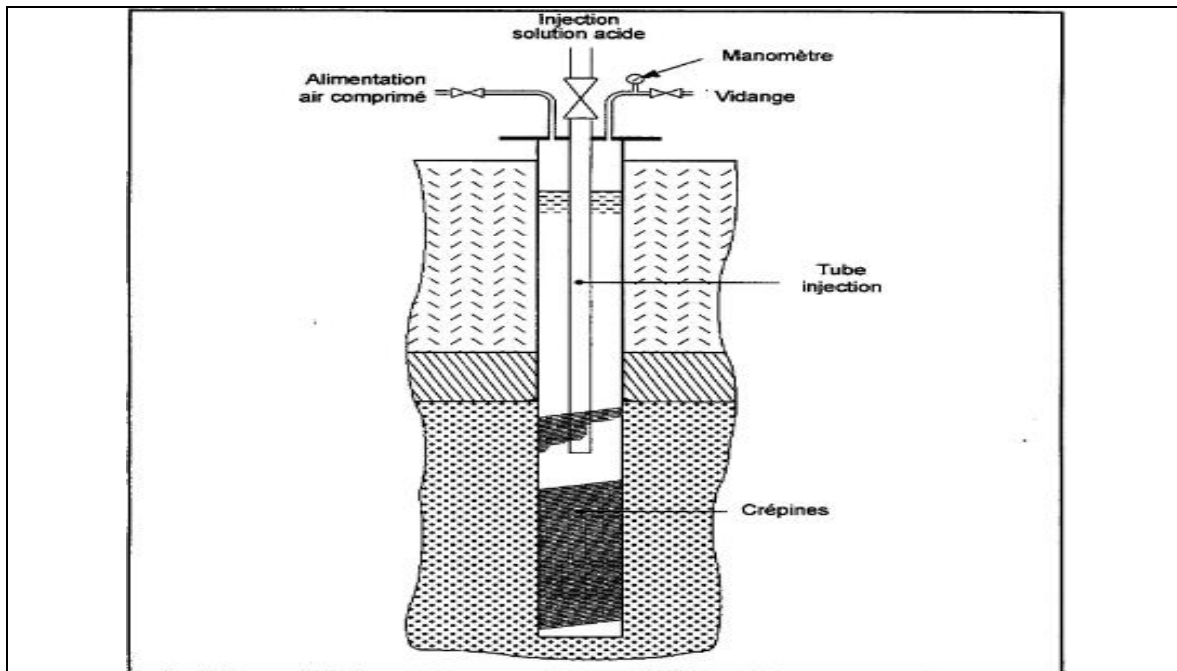


Figure III.09 : Schéma de l'équipement des forages pendant le traitement à l'acide chlorhydrique.(B.Sourisseau,J.-R.DAUM,G.LONGIN, 1998).

2. Par le chlore :

Le chlore gazeux est plus efficace, mais son emploi nécessite un équipement spécial que ne possèdent guère que les entreprises importantes ; d'ailleurs, sous cette forme, il est très corrosif, toxique et dangereux à respirer. On peut l'introduire dans le forage, en solution dans l'eau, par un petit tube en matière plastique, à raison de 15 à 20 kg de chlore, mis en place lentement pendant une période de 10 à 12 heures, s'il s'agit d'un ouvrage important.

3. Aux polyphosphates :

Agissant sur les échanges sodium-calcium, ils provoquent la défloculation des argiles, ensuite éliminées par pompage. Ils ne sont à employer que dans des terrains peu colmatés par des éléments argileux. Ils donnent de très mauvais résultats dans les terrains nettement argileux-Leur mise en œuvre s'effectue par des pistonnages successifs pour obtenir un effet mécanique qui déstabilise le dépôt argileux.

Différents produits provenant de sels de soude (pyrophosphates tétrasodiques - hexamétophosphates de sodium, etc..) peuvent être utilisés. Leur limite d'emploi est fixée par la température qui doit rester inférieure à 60-70° C. Leur action varie avec le pH. Les échantillons du terrain aquifère seront analysés pour consulter les fournisseurs et fixer un choix.

A doses faibles, les solutions de polyphosphates permettent de dissoudre le dépôt formé sur la paroi du forage par le fluide de circulation.

Les techniques de traitement peuvent faire succéder de courts pompages de débit supérieur au débit d'exploitation (de 20 à 30 %), des circulations d'air comprimé et des injections intermittentes de polyphosphates afin de défloculer les argiles.

En cas d'acidification des précautions sont à prendre. Les polyphosphates placés dans un milieu acide tendraient à effectuer une réversion en orthophosphates agissant comme un floculant pour les argiles. (J.PERON, 1980)

4. Traitements mixtes :

Si l'analyse préalable, a révélé la présence simultanée de carbonates, de bactéries et d'oxydes, l'on peut, efficacement, alterner traitements aux acides ou aux polyphosphates et traitements au chlore, en commençant d'abord par l'acide ou les polyphosphates et, s'il y a lieu, recommencer plusieurs fois ces opérations.

III.4.7.1.2. Traitements physiques :

L'action sur les incrustations est à la fois chimique, analogue à celle d'un détergent, et mécanique sous l'effet de jets à très forte pression. Les matières, dissoutes, désagrégées, décroisées de leur support sont, ensuite, facilement extraites par pompage, air-lift, ou par cuillérage. Si la pompe d'exploitation n'a pas été démontée, la solution, une fois introduite dans le forage, est brassée par la pompe elle-même, dont le refoulement est renvoyé dans la crépine.

1. Par exhaure :

Par pompage à débit progressif, augmentant par exemple de 10 % par 24 h jusqu'à dépasser d'au moins 50 % le débit d'exploitation demandé ou à débit variable mais en évitant l'utilisation d'une pompe trop puissante fonctionnant par intermittence, ce qui modifierait trop brutalement la granulométrie du terrain.

La solution est envoyée directement dans la crépine par le refoulement d'une pompe à forte pression à travers les dusses de l'outil à jets, déplacé verticalement sur toute la hauteur de la partie crépine. L'opération pourra être prolongée pendant au moins 24 heures et recommencée plusieurs fois. Les résultats sont encore meilleurs si, de temps en temps, on peut faire baisser le niveau dans le forage, par pompage ou air-lift, puis réinjecter la solution ainsi extraite. Par ce moyen, il se produit, dans la formation aquifère adjacente, un mouvement alterné qui facilite le décrochage des incrustations et leur entraînement à l'intérieur de la crépine d'où elles seront extraites.

2. Par fracturation :

Le traitement à l'explosif n'est guère employé pour accroître la fissuration des terrains rocheux. Considéré comme l'intervention de la dernière chance, il consiste à faire exploser une charge importante (de 50 à 250 Kg de nitroglycérine ou de dynamite gomme) dans un ouvrage que toute autre opération n'a pu rendre productif.

On lui préfère la fracturation hydraulique à très haute pression en l'associant éventuellement à l'acidification. L'exécution en est confiée à des entreprises spécialisées. (J.PERON, 1980).

3.Par action mécanique et agitation : grâce a brosse métallique et à la soupape ou à l'air comprimé, et effectuée à l'intérieur du forage à différents niveaux.(J.PERON,1980).



Figure III.10 : préparation du matériel pour le brossage mécanique et le curage air-lift (O. Dureau, 2007).

L'action mécanique des levages jets est au moins aussi efficace que l'action chimique de la solution, mais, il faut bien le dire, le mode de construction de la crépine influe beaucoup sur l'efficacité du procédé. Selon la forme de la fente ou des perforations de cette crépine, la force des jets peut se trouver, soit augmentée, soit considérablement réduite ou même complètement anéantie (crépines munies d'un fourreau de gravier collé à chaud sur monture « lanternée »).



Figure III.11: récupération du mélange eau, air et dépôts lors du nettoyage par air lift. (O. Dureau, 2007).

III.4.7.1.3. Conclusion sur le traitement contre les incrustations :

Il est bien rare qu'on ne puisse, avec un ou plusieurs procédés, éliminer les incrustations installées dans une crépine ou dans le massif de gravier additionnel ou encore dans la formation aquifère adjacente. On doit pouvoir retrouver souvent même améliorer la capacité spécifique obtenue aux premiers essais. Pour augmenter les chances de succès de ces opérations, mieux vaut équiper le forage, au moment de son exécution, d'une crépine à fente hélicoïdale profilée et continue et, de préférence, en acier Inoxydable, afin de pouvoir, éventuellement, traiter l'ouvrage avec des solutions chimiques appropriées et sous forte pression sans risquer de détériorer les «œuvres vives » du forage.

Il paraît intéressant de dire que les méthodes décrites dans ce chapitre seraient également très propices à une extraction de crépine, si, pour une raison quelconque, cette

opération était nécessaire. La pratique de visites de contrôle périodiques et régulières est un excellent moyen qui permet de dresser le « graphique de température » de l'ouvrage et de déceler, dès le début, toute tendance à une baisse de régime. L'intervention sera d'autant moins coûteuse et plus efficace qu'elle aura pu être entreprise plus tôt.

III.4.7.2. Traitement contre la corrosion :

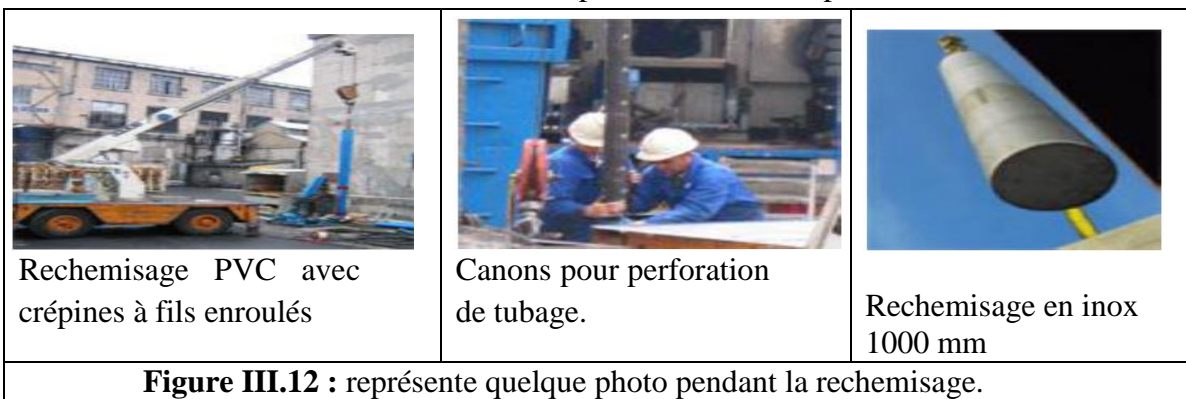
Le traitement des forages contre la corrosion dépend de l'effet des facteurs de corrosion et l'état de forage, et la contrainte et formation des couches géologiques de (possibilité de renouvellement des tubages), et le dimensionnement des équipements du forage.

III.4.7.2.1. Renouvellement :

On peut, parfois, tenter de prolonger quelque peu la vie de l'ouvrage en le curant et en introduisant à l'intérieur une seconde crépine, mieux adaptée. Il est rare cependant que cette solution résiste bien longtemps.

L'extraction de la crépine avariée et son remplacement par une autre, constituée d'un métal résistant mieux à la corrosion est préférable, mais cette opération n'est pas toujours possible. Elle est pratiquement irréalisable s'il s'agit pour la crépine corrodée, d'un élément présentant extérieurement un relief important (crépine à persiennes, à nervures repoussées, ou garnie d'un manchon de gravier collé), car l'ancrage dans le gravier additionnel ou dans le terrain s'oppose formellement à l'extraction.

Il est donc toujours préférable d'employer des crépines lisses, lanternées ou constituées par l'enroulement en hélice d'un fil continu. Parfois la crépine est tellement avariée, déchirée en plusieurs ouvertures béantes qu'elle ne résiste pas à l'effort de traction nécessaire à son extraction. Il faut la retirer par morceaux et l'opération est difficile.



III.4.7.2.2. Recommandation :

Il est évident qu'avant d'introduire une crépine dans un forage, une analyse de l'eau et, si possible, du terrain aquifère, s'impose. Bien souvent, une deuxième analyse, effectuée au moment où apparaît la corrosion, donnera des résultats assez différents de ceux qu'on a pu obtenir à l'origine de l'exploitation de l'ouvrage. Elle révélera sans doute une augmentation de l'agressivité des éléments liquides ou solides de la nappe.

Cela s'explique par le fait qu'en mettant celle-ci en dépression par le pompage, on introduit dans la zone entourant la crépine une eau pouvant provenir de régions éloignées renfermant des couches minérales propices à la corrosion. Ainsi se trouvent transportés

vers le forage des sels ou des gaz corrosifs dissous. Leur action sur le métal est allée croissant jusqu'à la disparition progressive de la crépine.

Il faut dire aussi qu'un échantillon d'eau, remonté à la surface pour y être analysé, ne se trouve plus, au moment des mesures en laboratoire, dans les mêmes conditions de température et de pression qui étaient les siennes au sein du terrain aquifère. Ainsi, les résultats de l'analyse, auxquels il est pratiquement impossible d'apporter un facteur correctif quelconque, peuvent ne pas donner une idée exacte de l'agressivité du milieu en place au fond de l'ouvrage.

III.4.7.2.3. Protection contre la corrosion :

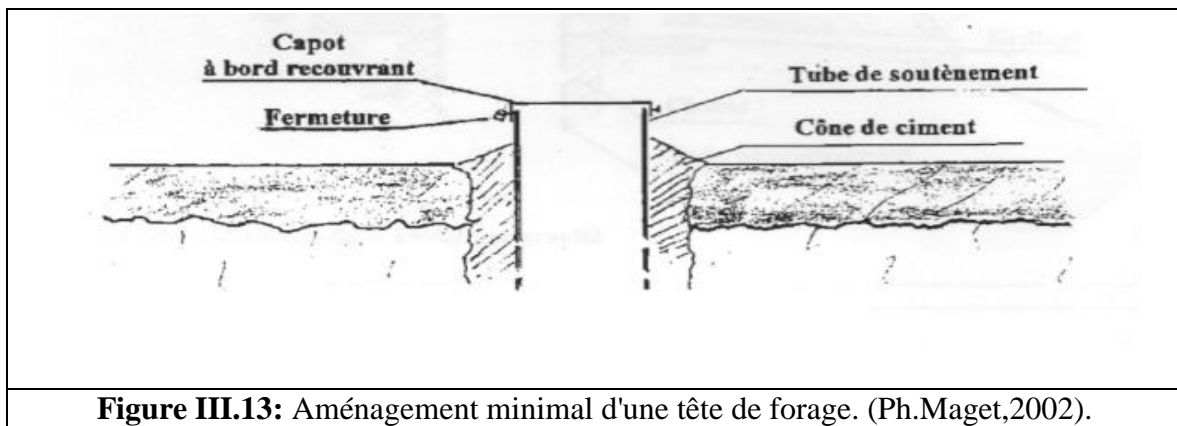
Il existe plusieurs solutions préventives :

- ✓ Isolation,
- ✓ Protection passive par revêtements ;
- ✓ Protection cathodique ;
- ✓ Réduction de la vitesse de passage de l'eau dans la crépine ;

III.4.7.3. Aménagement de tête du forage :

III.4.7.3.1. Aménagement hors sol :

Cet aménagement minimal répond essentiellement aux travaux faits couramment dans la région rurale. 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.



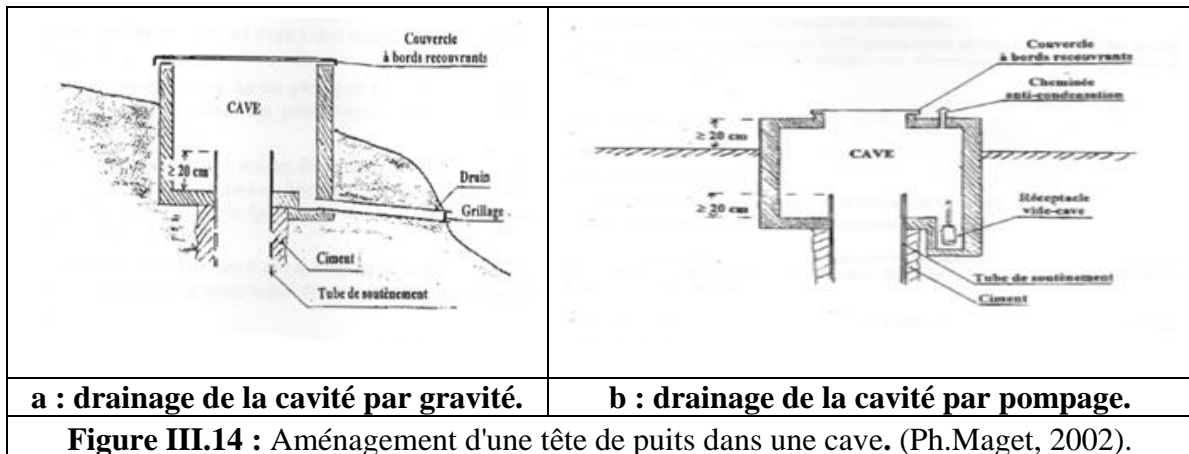
Descriptif :

- 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 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 cadencassé 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. (ph.Maget, 2002).

III.4.7.3.2. Tête de puits 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 III.14, suivant les conditions de drainage des eaux au fond de la cave : par écoulement gravitaire ou par pompe vide-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 III.14 :
 - . 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. (Ph.Maget, 2002).

Un forage qui est resté sans protection sans couvercle ou structure de surface pendant quelque temps sera presque certainement perdu en raison.

III.4.7.3.3. Equipement 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 III.15, pour les deux types d'ouvrages : les têtes de forage au niveau du sol ou dans une cave.

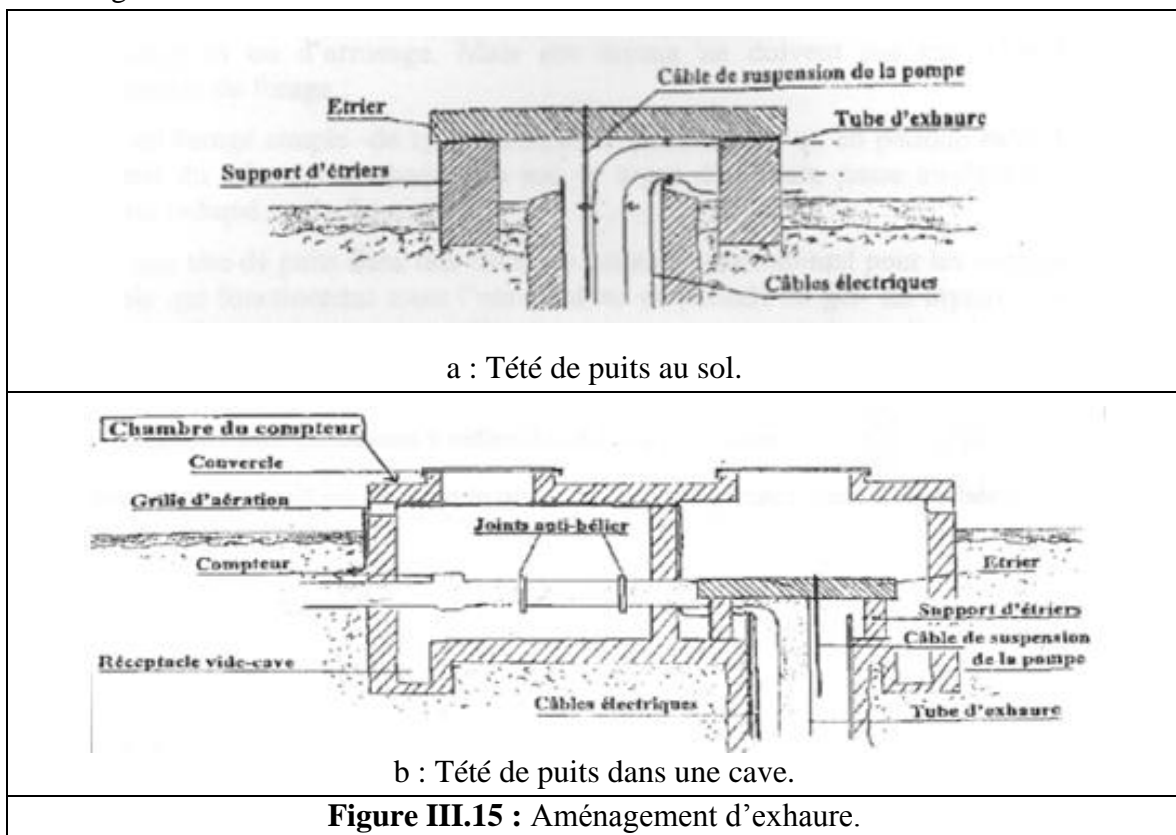


Figure III.15 : Aménagement d'exhaure.

1. 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.

2. 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 III.15a.
- 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. III.15b). Cette chambre doit être drainée comme la cave de tête de puits (cf. §, III.4.7.3.2.). L'étanchéité du passage de la conduite dans les parois de la chambre est alors facile à contrôler.



Figure III.16 : Remise en place d'une colonne inox à raccords rapides.

3. 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.

III.4.8. Stérilisation du forage :

Après le traitement, il convient de pomper à grand débit pendant deux heures au moins et jusqu'à élimination complète de toute trace d'acide, ce qu'on peut vérifier avec du papier imprégné de teinture de tournesol.

Les forages touchés par des incrustations de fer devraient être stérilisés par chloration entre le nettoyage et l'essai par paliers de débit, afin de détruire les Ferro bactéries omniprésentes et de ralentir la réinfection du forage. Du HTH en granules peut être dissous et ajouté de façon à laisser environ 50 milligrammes de chlore libre résiduel par litre dans l'eau du forage. Il est possible de mélanger la solution dans le forage en injectant de l'air avec la conduite utilisée pour le pompage par air lift. La concentration devrait être surveillée à l'aide d'un kit de contrôle de la qualité de l'eau comme le kit Oxfam-DelAgua. Le forage peut ensuite être soumis à des essais de pompage.(Robert Mardini, mars 2012).



Figure III.17: sable accumulé au fond du forage s'est déposé dans le bac de décantation.(O. Dureau, 2007).

On s'est aperçu que l'adjonction de stérilisants aux produits cités plus haut en augmentait le rendement, ce qui indiquait que les bactéries jouent un rôle non négligeable dans beaucoup de types de colmatage. La stérilisation périodique des ouvrages doit être faite pour empêcher la formation de produits colmatants indurés. Si les bactéries peuvent s'immuniser contre des produits qui perturbent leur métabolisme, elles ne le peuvent pas contre le chlore qui les brûle, et ne résistent pas à une température supérieure à 50 °C pendant quelques minutes.





Les produits les plus utilisés sont le chlore à la dose moyenne de 1 g/l, ou sous forme d'hypochlorite de calcium ($\text{Ca}(\text{ClO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et des ammoniums quaternaires variés plus faciles à manier. L'hypochlorite de sodium. Le permanganate de potasse, etc... Sont aussi utilisés, mais sans avantage sur les produits ci-dessus. (R.DEGALLIER, 1985).



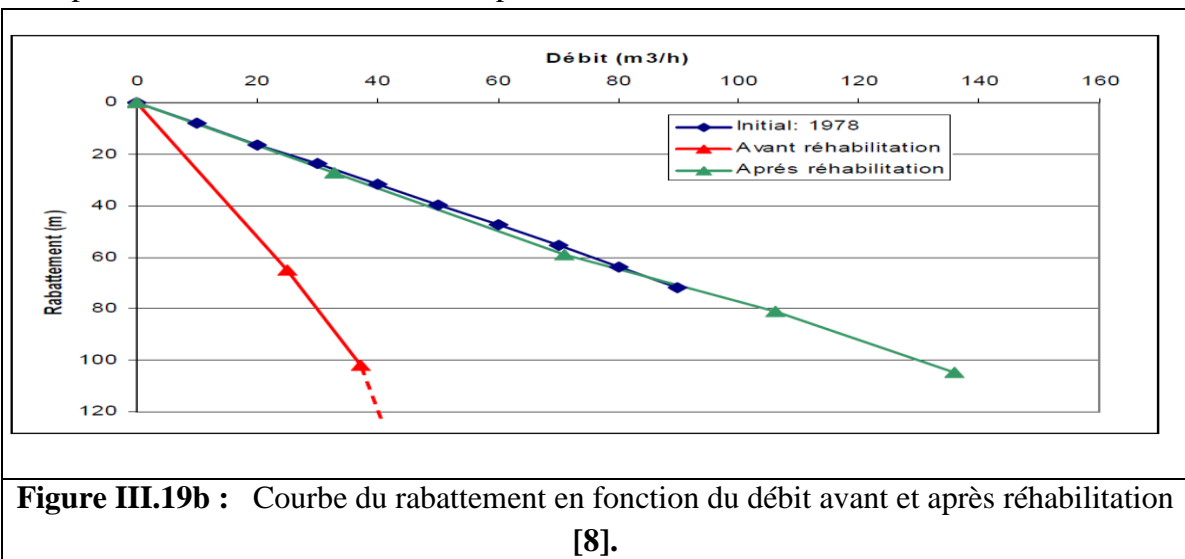
Figure III.18 : Remise en service de la colonne de refoulement. (O. Dureau, 2007).

III.4.9. vérification et Test par paliers de débit :

La vérification de réhabilitations en peut constater par camera vidéo pour avoir l'effet de réhabilitation et leur activations.

 <p>D: 0015,6</p> <p>vue de concrétions sur les parois probablement carbonatées</p>	 <p>ROT: 000 L: 015,7</p> <p>vue des crépines propres après nettoyage</p>
 <p>D: 0018,7</p> <p>vue du fond de l'ouvrage</p>	 <p>ROT: 328 L: 018,9</p> <p>vue du fond de l'ouvrage, présence d'un bouchon de fond en béton</p>
<p>Avant la réhabilitation</p>	<p>Après la réhabilitation</p>
<p>Figure III.19a : Comparaison avant et apres la rehabilitation[8].</p>	

On peut aussi vérifie la réhabituions par la courbe de rabattement en fonction de débit.



Un test (essai de pompage) par paliers de débit indiquera si la réhabilitation a réussi. Il peut aussi servir de nouveau point de référence pour mesurer le futur rendement du forage.

L'essai de pompage d'un forage réhabilité aidera aussi à rétablir l'écoulement normal des eaux souterraines et à éliminer les particules de limon restantes. (le fiche de test de palier de débit donne par l'annexe 2).

Il s'effectue en réalisant des paliers de débit constant pendant une courte durée. On mesure le rabattement à la fin de chaque palier ainsi que le débit. Chaque palier est suivi par un arrêt d'une durée permettant la remontée de niveau d'eau. Par expériences, trois paliers avec débits croissants, dont chacun de deux heures sont Suffisants. (M.Metaiche, 2013).



Figure III.20 : Aspect d'eau après les Test par palier de débit.

III.5. Conclusion :

A la fin de ce chapitre on constate que les réhabilitations des forages d'eau se sont effectuées en quatre phases principales : la recherche et le recueil des informations, Diagnostic, Décision et traitement.

À ce stade il est nécessaire de poser la question de la poursuite éventuelle du diagnostic de façon plus précise afin d'en valider l'intérêt. En effet, un diagnostic plus complet est coûteux et long, nécessitant un appareillage spécialisé, des analyses de laboratoire et la mobilisation de ressources humaines et matérielles importantes.

La décision devra être prise en considérant le coût et la faisabilité des opérations à mener ainsi que la pertinence de réaliser une réhabilitation par rapport à d'autres alternatives.

On peut estimer en général que le coût d'une simple réhabilitation (sans remplacement du tubage) reviendra à environ 10 % du prix d'un nouveau forage.

Dans certains cas, le bilan du diagnostic préalable du puits peut conduire à l'abandon du projet de réhabilitation et, si nécessaire, à la neutralisation du puits si les objectifs de quantité et de qualité correspondants aux usages prévus de l'eau ne sont pas atteignables ou si les dommages du puits sont trop importants.

Chapitre IV :

Etude de Cas

IV.1.Introduction :

Bien sûr, le but de recherche est le développement de la partie pratique. On va essayer dans ce chapitre de faire une étude d'application de réhabilitation du forage de MERKSANE et on va voir quelques obstacles qui nous empêchent de réaliser cette étude bien comme il faut.

IV.2.Présentation du forage de MERKSANE :

IV.2.1.localisation du forage de la MERKSANE :

Le forage du MERKSANE, situé dans la Commune de DEBDEB Wilaya de ILLIZI, est destiné à alimenter en eau potable l'agglomération de MERKSANE. Les coordonnées géographiques du forage données par le GPS sont comme suitvant :

X : 09° 22' 48" E.

Y : 30°10'34" N.

Z : 71 m. (DRE Illizi, 2014).



IV.2.2. Les caractéristiques du forage MERKSANE:

Le forage de MERKSANE c'est un forage dont la réalisation est ancienne. Cet ouvrage présente les caractéristiques suivantes :

- profondeur de 800 mètres.
 - diamètre intérieur de 400 mm.
 - débit de forage 45 l/s avec une vitesse de 0,36 m/s.
 - volume annuel d'eau prélevé : entre 709560m³ et 946080m³.
- Soit un volume journalier moyen de 1944m³ à 2600m³. (DRE Illizi).

IV.2.3. Type de forage :

Le forage de MERKSANE est un forage artésien jaillissant (DRE Illizi). C'est-à-dire la nappe qui est captée par ce forage est captive avec un potentiel (charge) au-dessus du niveau du sol.

IV.2.4. Les équipements du forage :

Le forage de MERKSANE est équipé par des tubages de type API et sont reliés entre eux par filetage à chaque 10 mètres et avec une crépine à la partie pénétrante dans la nappe captant. D'une tête permettant la modélisation de ce forage constitue d'une vanne de fermeture et un petit réservoir qui permet la division du débit de forage. Les constituants de la tête sont raccordés entre eux par des brides maintenu par des boulons.



Figure IV.02 : Les équipements du forage de MERKSANE. (DRE Illizi).

IV.2.5. Importance du forage de MERKSANE :

Le forage de MERKSANE alimente le château d'eau qui alimente le réseau de distribution de l'agglomération MERKSANE. Aussi, on peut alimenter directement à l'aide d'un raccordement directe le réseau de distribution de l'agglomération de MERKSANE.

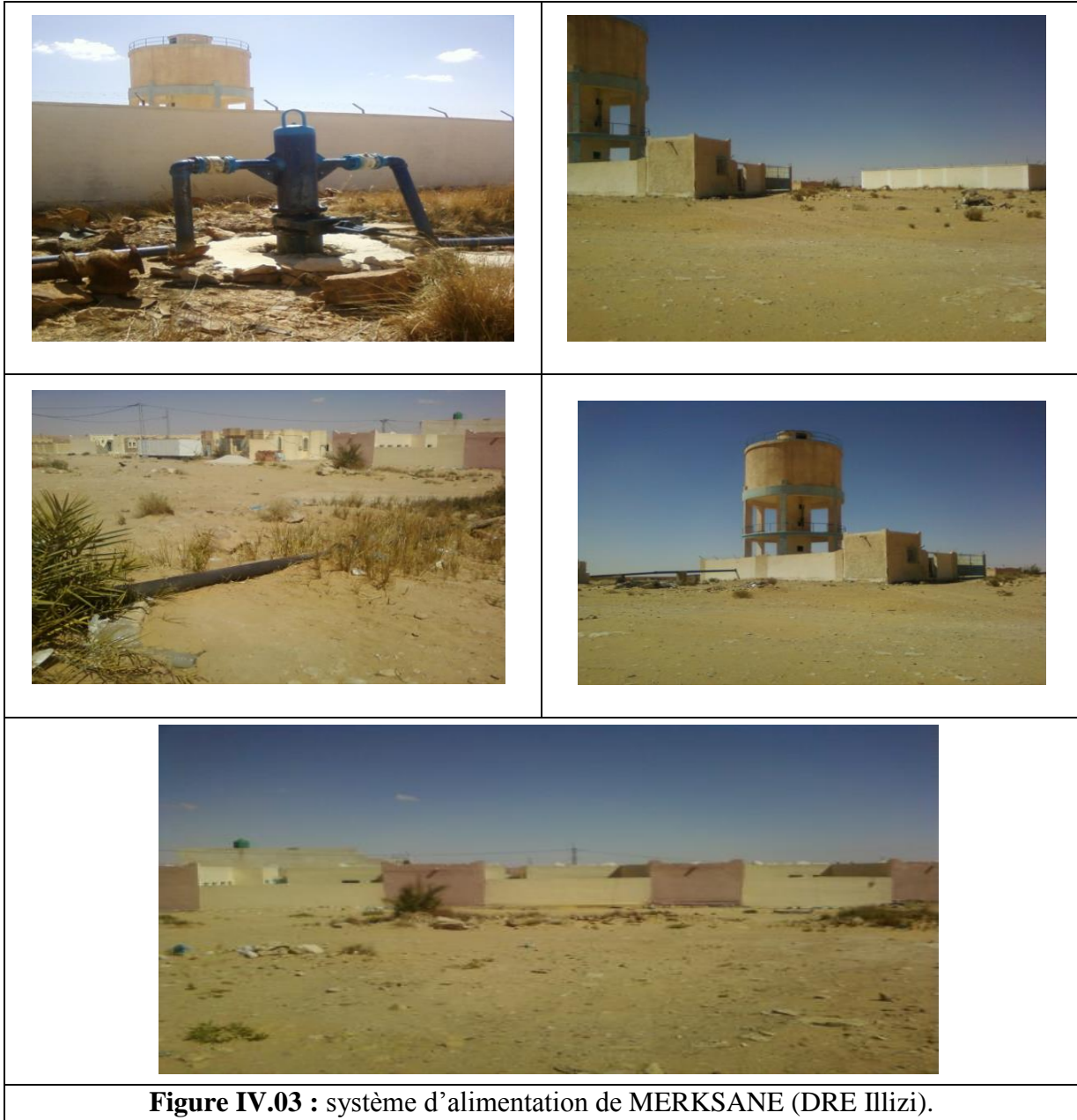


Figure IV.03 : système d'alimentation de MERKSANE (DRE Illizi).

IV.3.Pourquoi réhabiliter le forage de MERKSANE :

Afin de s'assurer de la pérennité de cet ouvrage, et éviter toute détérioration de ses équipements et notamment conserver sa capacité de production qui a baissé dans le dernier temps de son exploitation. Même aussi on a remarqué une dégradation de la qualité des eaux distribuées. Ces problèmes ont poussé la direction des ressources en eau de la wilaya d'illizi de proposer la réhabilitation du forage de MERKSANE le 20 mai 2014.



IV.4.Etude de réhabilitation du forage :

IV.4.1.Collection des informations :

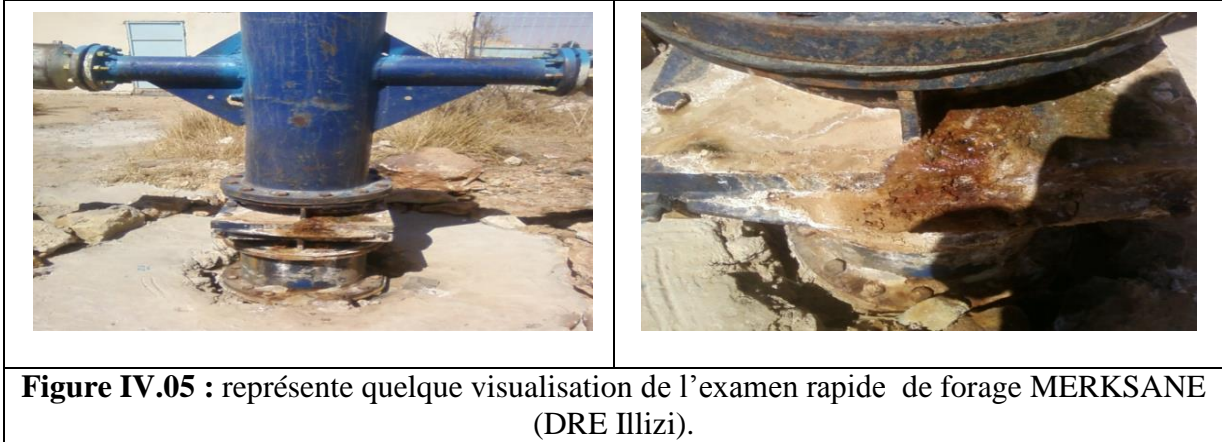
Les informations primaires possibles concernant le forage de MERKSANE qui peuvent aider à la bonne étude de réhabilitation de ce forage sont données auparavant.

IV.4.2.Réparation mécanique :

Ce forage ne contient pas de pompe immergée et le tuyau d'exhaure car le forage de MERKSANE est de type artésien jaillissant mais contient une vanne dans sa tête permettant de régler le débit extrait. La réparation mécanique pour la réhabilitation de ce forage est faite après un rabattement de niveau de l'eau par pompage excessif.

IV.4.3.Examen rapide :

L'examen rapide est requis sur l'observation des équipements d'exhaure et la qualité de l'eau. Mais dans notre cas il n'y a pas des pompes seulement l'analyse des éléments physico-chimiques qui permettent de décrire la qualité de l'eau.



IV.4.4.Auscultation à l'aide de caméra vidéo :

L'auscultation de forage de MERKSEN à l'aide d'une caméra vidéo permet de donner l'état réel de ce forage et de son équipement, et aussi donner les types des forages si on change le potentiel de la nappe à cause d'une surexploitation. Elle permet de donner des autres informations concernant le type et nature des matériaux de tubage.

1. Etat du forage MERKSANE :

La figure IV.06 présente les résultats d'auscultation du forage de MERKSANE par camera. Ces résultats sont détaillés ci après.

À la profondeur 10,11m, on a présence de traces sur la paroi de tubage qui est très rugueuse au début de l'auscultation jusqu'à ce profondeur comme il est représenté par la figure IV.07 :

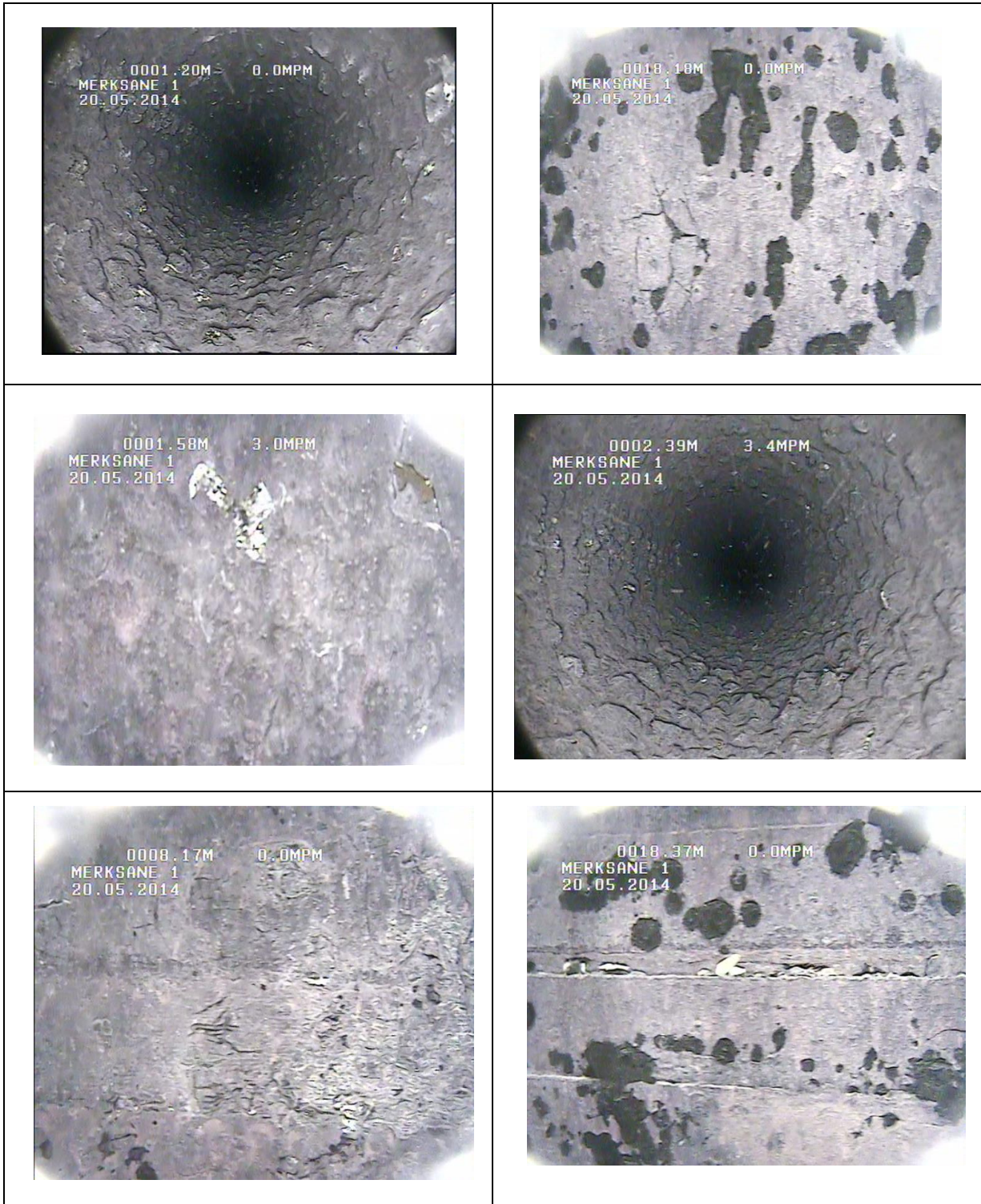


Figure IV.06 : Auscultation du forage de MERKSANE à la partie de profondeur 8.17m a 18.37m. (DRE Illizi, 2014).



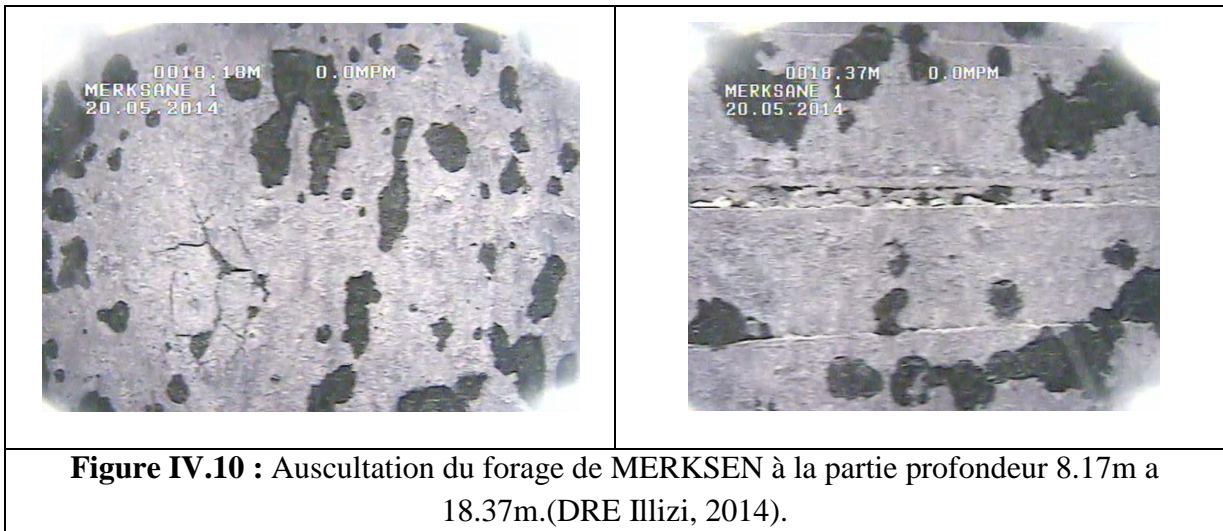
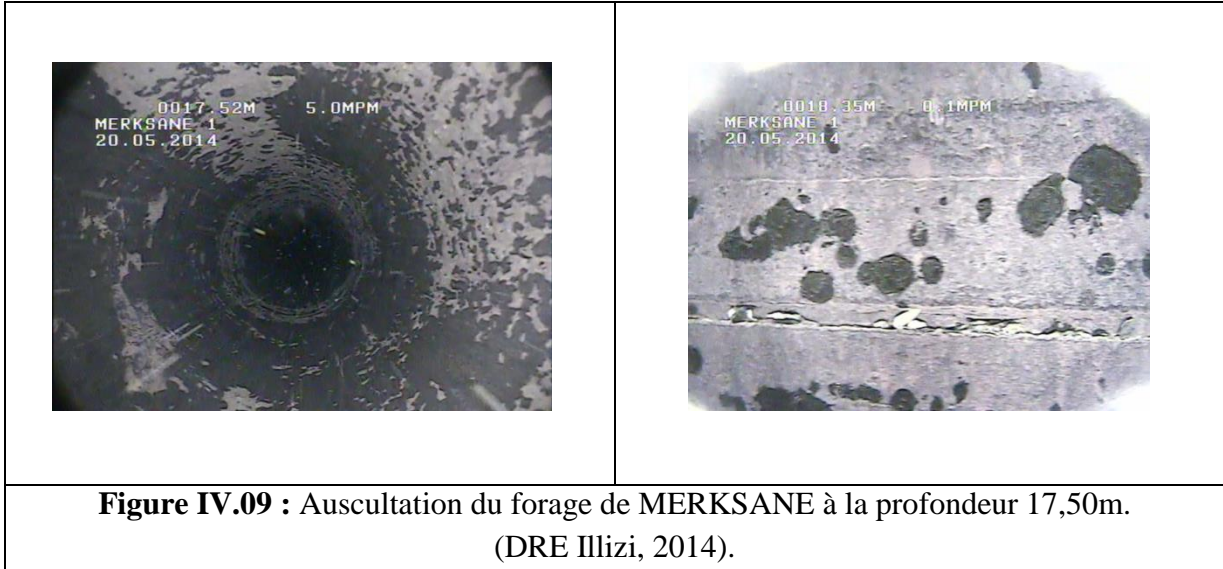
Figure IV.07 : Auscultation du forage de MERKSANE à la partie profondeur 8.17m a 18.37m.

A la profondeur de 10.90m, les traces sont avec une densité importante sur toute la surface de la paroi jusqu'à la profondeur de 12.82m, les traces noires concentrés sur un coté de la surface de paroi avec une densité très importante mais la rugosité de la paroi de tubage est moins par rapport au cas précédent voir la figure IV.08 :

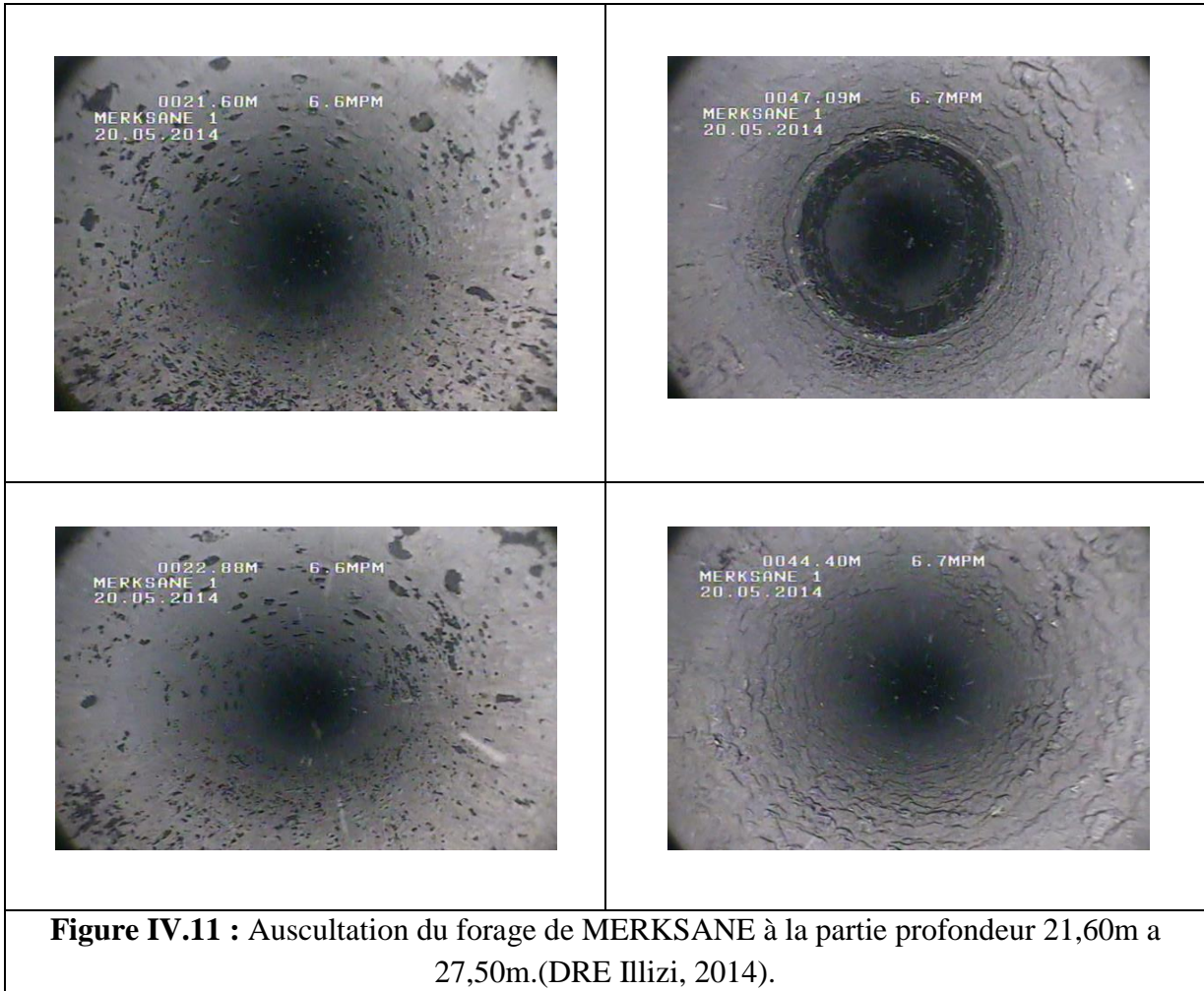


Figure IV.08 : Auscultation du forage de MERKSANE à la partie profondeur 10,90m a 12,82m. (DRE Illizi, 2014).

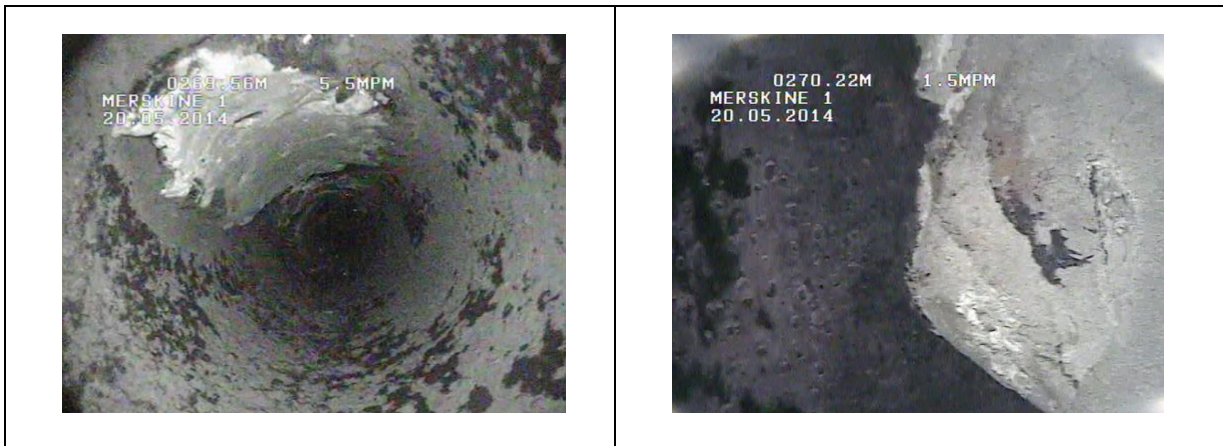
À la profondeur de 17.5m : les traces reviennent sur toute la surface de la paroi de tubage avec une densité très importante et il y a quelque petites fissurations dans la paroi de tubage avec un gonflement au niveau de raccordement (filetage). Ces résultats sont représentés par la figure IV.09 et IV.10 :

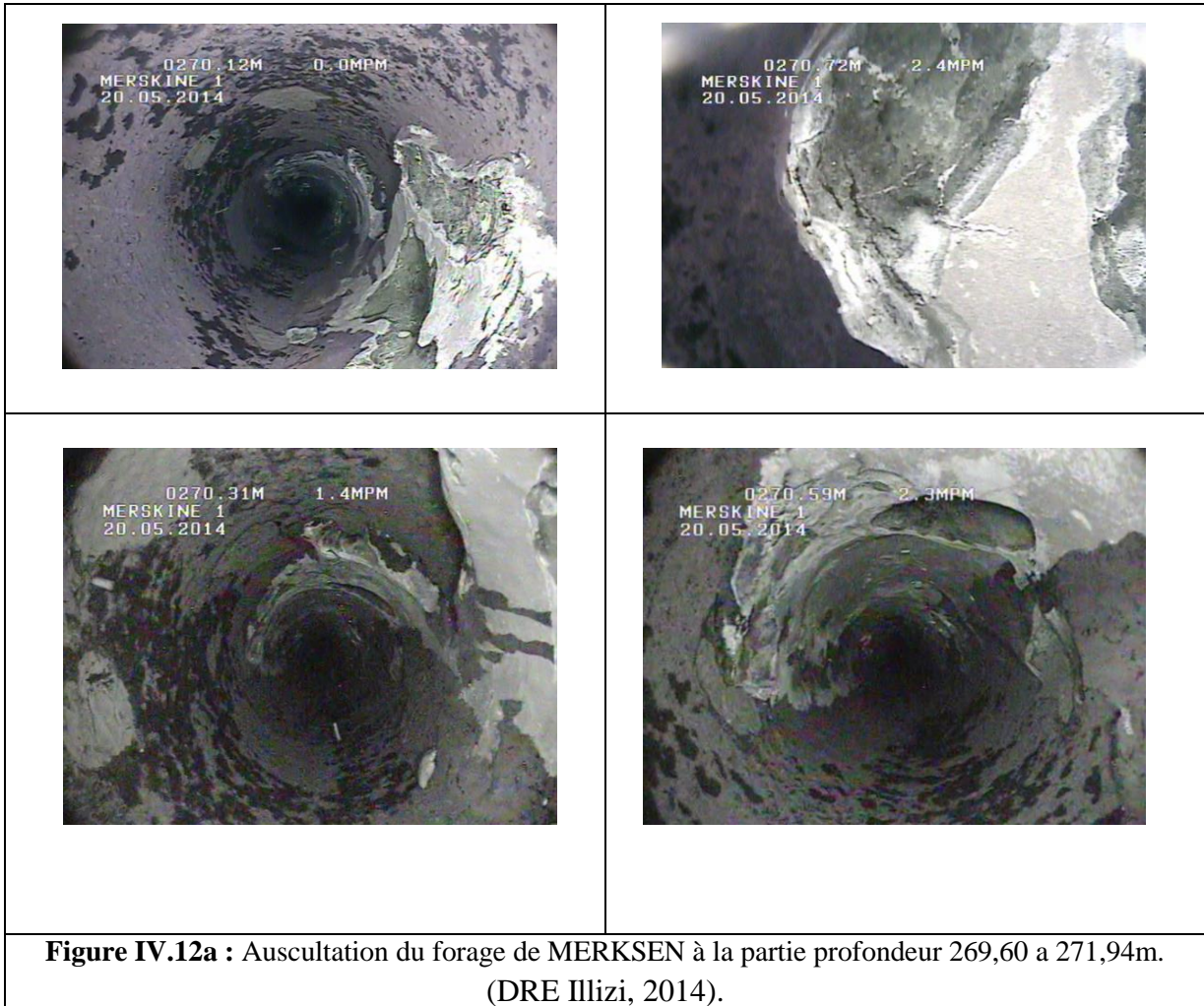


A la profondeur de 21.6m : les traces avec une densité faible jusqu'à profondeur de 27.5m. Cette variation de l'état de tubage de ce forage au-dessus de profondeur de 25.30m reste jusqu'à 242.40m. On a un changement brusque de l'état de paroi ; ayant une rugosité très importante. Ce type reste à une profondeur de 248.58m, et après cette profondeur la rugosité de paroi de tubage est moyenne avec des traces jusqu'à 268.5m.



A la profondeur : 269.6m il y a des dépôts blancs sur le coté de cette profondeur jusqu'à 271.94m avec une rupture et fissuration dangereuse. Cet aspect est très important dans les profondeurs suivantes : 269.58, 270.12 m comme il est représenté par les figures suivant :





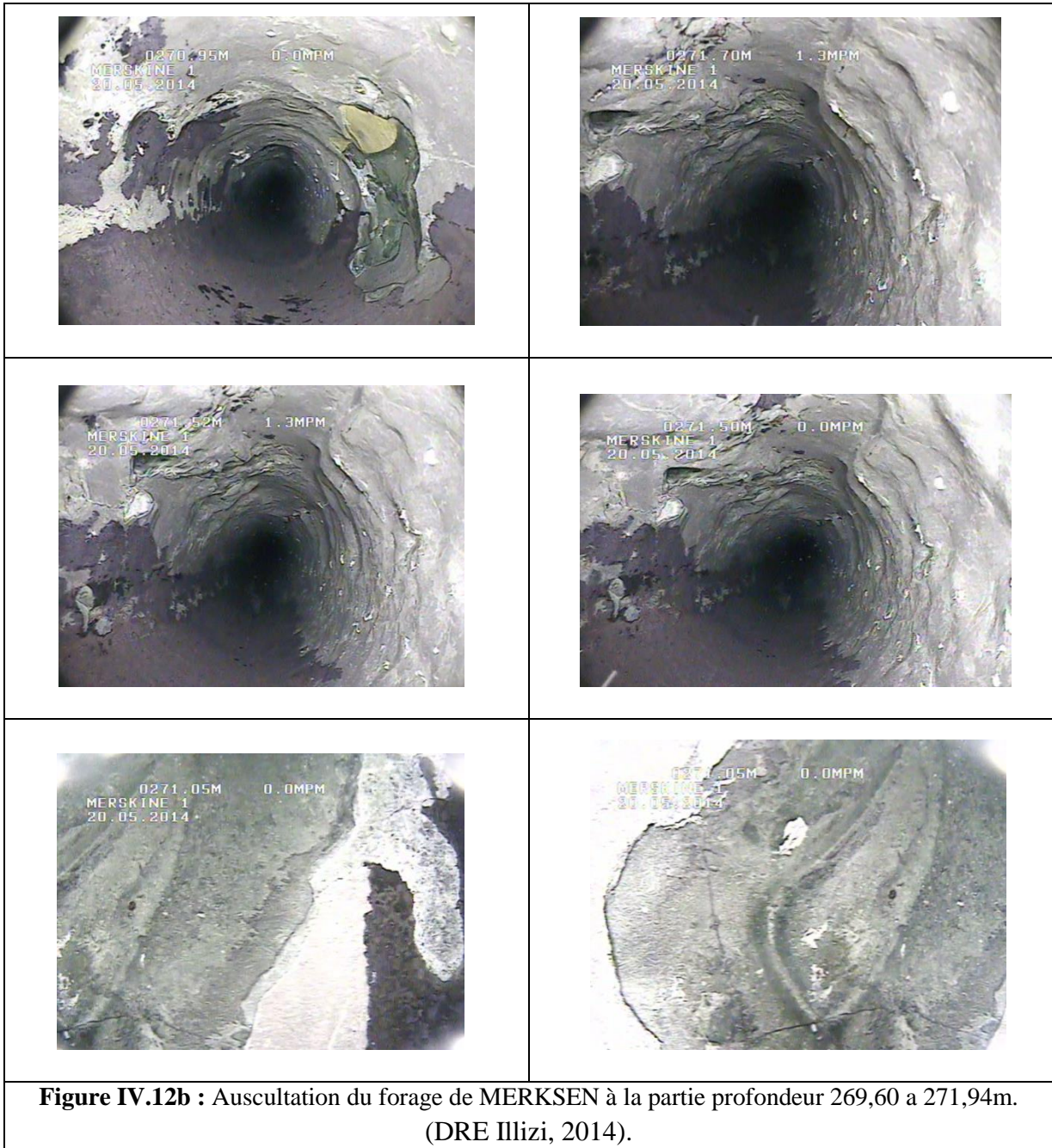


Figure IV.12b : Auscultation du forage de MERKSEN à la partie profondeur 269,60 a 271,94m. (DRE Illizi, 2014).

A la profondeur 271.30m la caméra ne peut pas dépasser cette profondeur à cause des dépôts avec une quantité très importante qui rétrécissent la section du forage.

2. Le matériel utilisé :

Le matériel utilisé pour l'opération de visionnage est constitué de :

- Une caméra couleur avec capacité d'inspection radiale et axiale avec une sensibilité améliorée à 0.5 lux.
- Un treuil avec 600 m de câble coaxial de 3/16".
- Une unité de contrôle avec un enregistreur DVD.(DRE Illizi, 2014).

3. Conclusion sur l'auscultation :

L'auscultation de ce forage de MERKSANE a permis de donner l'état de ce forage, qui est de bon état jusqu'à la profondeur de 269.6m, mais il y a des traces sur la paroi de tubage avec densité faible et moyenne.

Au delà de la profondeur de 269,60m jusqu'à 271.90m l'état de forage se dégrade, apparition des fissures, rupture de la paroi de tubage et l'existence de dépôts blancs faisant un rétrécissement du diamètre de tubage. Ce rétrécissement empêche la caméra de passer à travers.

IV.4.5.Diagnostic :

Le diagnostic des phénomènes qui touchent le forage de MERKSANE est basé totalement sur l'auscultation à la caméra vidéo car dans ce cas on a manqué de données de réalisation. Mais l'auscultation n'a pas pu couvrir complètement le forage.

Après l'auscultation jusqu'à la profondeur 269.60 m les effets de phénomène d'érosion qui touche l'ouvrage ne sont pas graves, car ils sont juste des traces superficielles sur la paroi de tubage, donc n'est pas important. Et par cela l'état de forage est bon jusqu'à la profondeur 269.50m.

Au delà de la profondeur 269.60m les dépôts blancs sont dus à l'incrustation de l'eau. Il s'agit des carbonates de calcium (calcaire) ou des sulfates de calcium et d'hydroxyde de Magnésium. La présence de fissuration et rupture à côté de ces dépôts mettent l'ouvrage en mauvais état.

Conclusion sur le diagnostic :

Les équipements (tubages) de forage d'eau de MERKSANE sont en bon état, seulement il existe de quelques traces d'érosion jusqu'à la profondeur 269,60m. Mais après cette profondeur les tubages sont de mauvais état.

Il est alors nécessaire de faire la réhabilitation de ce forage afin de pouvoir continuer d'alimenter l'agglomération de Merksane en eau potable.

IV.4.6.Décision :

Il est nécessaire de procéder à l'enlèvement des dépôts situés à la profondeur 269 m et de contrôler le forage par une sonde jusqu'à la fin du forage pour pouvoir continuer le visionnage. (DRE Illizi, 2014).

IV.4.7.Le choix de la technique :

Le choix de la technique de réhabilitation de ce forage MERKSEN est lié au type de traitement contre les effets du phénomène qui touchent cet ouvrage. La technique qui a été choisie est mécanique et le procédé de traitement est par brossage, bien sûr, cette technique se fait à l'aide d'aménagement de la plateforme et par installation de l'appareil de forage avec tous les équipements nécessaires. La technique choisie peut supprimer les fuites et

traite la fissuration au-dessous de profondeur 269.60m par rechemisage et renforcement par des tubages LAI 13''/3/8.(DRE Illizi, 2014).

IV.4.8.Traitement du forage :

Le traitement mécanique appliqué consiste à faire le traitement du nettoyage avec une vitesse de rotation faible puisque dans cette profondeur 269.60m l'ouvrage considère comme un point fragile. Après nettoyage de dépôt on peut continuer l'auscultation de la partie non contrôlée du forage. En suite on fait directement le rechemisage jusqu'à la profondeur 271.94m, pour éviter la destruction totale de tubage dans cette partie de profondeur.

Dans ce cas de réhabilitation de ce forage de MERKSANE, l'aménagement de tête est nécessaire pour éviter l'infiltration d'eau superficielle dans le forage comme représente la figure suivante :



Figure IV.13 : l'état de tête de forage de MERKSANE.(DRE Illizi).

IV.4.9.Stérilisation du forage :

La stérilisation de ce forage est facilement applicable du fait que le forage est artésien jaillissant. Les agrégats de dépôt (déchet de nettoyage) et le reste des produits chimiques déjà injectés sont rejetés automatiquement sous l'effet de la pression d'eau.

IV.4.10.Vérification et Test de débit :

Après réhabilitation du forage, on doit atteindre nos objectifs (obligation des résultats). Le forage ainsi réhabilité doit fonctionner avec sa capacité spécifique initiale. Le débit fourni initial est de 45l/s. sans oublier la qualité de l'eau extraite doit être conforme aux normes de potabilité.

IV.5.Conclusion :

En effet, les incidents ne peuvent malheureusement pas toujours être évités. Mais un contrôle régulier permet, dans la plupart des cas, de diagnostiquer les difficultés potentielles et par la suite d'y porter remède préventivement, sans conséquence dommageable pour l'alimentation en eau potable. Le forage de MERKSANE était l'objet de l'application des étapes de réhabilitation détaillées dans les chapitres précédents en suivant la méthodologie ainsi indiquée.

Conclusion générale

Conclusion générale

La réhabilitation consiste à mettre en œuvre toutes activités visant à améliorer la performance des ouvrages existants et à augmenter leur durée de vie de façon économique et durable.

Si le rendement d'un puits ou d'un forage diminue, il est possible à l'aide de certaines techniques de réhabilitation de redonner à l'ouvrage de captage son efficacité originale. Cependant, avant d'entreprendre ces travaux, il est primordial de vérifier si la construction du puits (plan tel que construit) permet de procéder à cette réhabilitation.

La décision finale de réhabiliter un forage dépend de l'état du forage existant, des phénomènes ayant provoqué les dommages, des facilités techniques et logistiques, des alternatives possibles (construction d'autres points d'eau) et de l'opinion des intéressés (les consommateurs et les opérateurs). Selon la gravité des problèmes rencontrés, les travaux nécessaires varient depuis une simple réparation de la superstructure jusqu'à des opérations de décolmatage ou de rééquipement.

La méthode proposée à la réhabilités et régénérés périodiquement est basée sur un procédé de nettoyage à la fois mécanique (brossage et haute pression) et chimique (injection de produit régénérant). Le diagnostic et le contrôle de l'exécution des travaux sont réalisés par des inspections télévisées (caméra vidéo) complétées par des essais de pompage.

La réhabilitation d'un forage colmaté, en dehors de causes particulières telles que les déformations ou ruptures de la colonne de tubage ou de la crépine, fait appel à des méthodes mécaniques ou chimiques adaptées à chaque cas. Elle n'est pas toujours possible. En cas d'échec, le forage doit être rebouché hermétiquement par cimentation. C'est pourquoi, en particulier dans les communes rurales ne disposant que d'un seul point d'eau, un entretien et une surveillance régulière sont indispensables. Cet entretien suppose une très bonne transmission des données entre le concepteur et l'exploitant. Il suppose également un budget, évalué à 8 à 10% du coût de l'ouvrage.(M.Detay, 1993).

Les études doivent d'abord établir la réalité d'une éventuelle baisse de débit d'un forage et diagnostiquer la cause qui peut-être imputable aussi bien à un système de pompage, une nappe trop sollicitée ou un colmatage des crépines.

La réhabilitation de puits existants vise à alimenter une communauté sans être contraint de réaliser un nouveau puits et en permettant de limiter les coûts. Avant d'engager le projet, il convient de s'assurer que le puits rénové pourra couvrir les besoins de ses usagers actuels mais aussi futurs et qu'il répondra aux attentes et aux motivations de la communauté villageoise.

Les conditions de réhabilitation des forages nécessitent une analyse détaillée des contextes hydrogéologique et technique de réalisation des ouvrages afin de mettre en œuvre la technique de régénération la plus adaptée dans un souci de conservation de quantité et qualité d'eau souterraine destinée à la consommation. Dans certains cas, le bilan du diagnostic préalable du puits peut conduire à l'abandon du projet de réhabilitation et, si nécessaire, à la neutralisation du puits si les objectifs de quantité et de qualité correspondants aux usages prévus de l'eau ne sont pas atteignables ou si les dommages du puits sont trop importants.

L'entretien des puits par des régénérations mécaniques et chimiques régulières permet de maintenir la productivité des ouvrages et de prolonger leur durée de vie.

Le forage de MERKSANE dans la wilaya d'Ilizi est l'un de ces cas, il a été endommagé par incrustation et corrosion et même par fissuration et rupture. La technique de traitement adoptée est bien mécanique par broyage et chemisage. La stérilisation de l'ouvrage est facile vue son type qui est artésien jaillissant.

Enfin nous espérons que ce présent travail a pu apporter quelques réponses aux problèmes d'exploitation des forages d'eau et qu'il constituera une référence aux étudiants qui s'intéressent au domaine des forages d'eau.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

ADAM P. Evaluation des projets en Eau et Assainissement dans les Plaines alluviales d'Haïti, Unicef, Port-au-Prince, Haïti, 1992.

Andrimont R. (1902-1904), Notes sur l'hydrologie du littoral belge. Ann. Soc. géai. Belg., 29-30.

Anonyme. (1987), Travaux de forage pour la recherche et l'exploitation d'eau potable – Marché de travaux – Cahier des clauses techniques générales - Bulletin Officiel - Fascicule N° 76 – Ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports.

Arago. (1834), Sur les puits forés connus sous le nom de puits artésiens, de fontaines artésiennes ou de fontaines jaillissantes. Annuaire 1835 du Bureau des Longitudes, Paris.

Benoît Miribel. (2006), Eau – Assainissement – Hygiène pour les populations à risque, EDITEUR 2006, HERMANN DES SCIENCES ET DES ARTS.

Benslimane Fetid. (1997), Méthodologie d'étude et de modélisation du transport de polluants organiques en milieux poreux naturels : application à l'étude de deux cas de pollutions issues de l'industrie du bois. Thèse INPL, LAEGO-EMN, Ecole Doctorale PROMEN. soutenue le 12/09/1997.

Bertrand Sourisseau, Jean-Robert Daum, Gérard Longin. (1998), Guide de bonne pratique et de contrôle des forages d'eau pour la protection de l'environnement : manuel et méthodes. Edition BRGM , P76.

Bodelle J., Margat J. (1980), L'eau Souterraine En . France . Paris : Masson, 1980. 207p.

Bonnet M. (1970). Critique de la notion d'essais de puits. Bull. B.R.G.M. Fr., (2), III, no 1, pp. 9-16.

Boursault H. (1900). Recherche des eaux. Paris.

BRGM. (1995), Équipement de forage d'exploitation d'eau minérale Approche méthodologique. BRGM : Note technique DNEMT n° 4, Novembre 1995.

BRGM. (2003), Référentiel hydrogéologique BDRFH, Guide méthodologique de découpage des entités- Rapport final BRGM RP-52261FR-Janvier 2003.

Carrefour des gestions Locales de l'eau : Le gestion patrimoniale des sites de prélèvements d'eaux souterraines profondes. Janvier 2012.

Castany G. (1963), Traité pratique des eaux souterraines. 2ème éd. 1968. Paris, Dunod.

Castany G. (1963), Traité pratique des eaux souterraines. 2ème éd. 1968. Paris, Dunod.

Castany G. (1968). Prospection et exploitation des eaux souterraines. Paris, Dunod.

CASTANY Gilbert. (1982), Principe et méthode de l'hydrogéologie. Dunod,. 237p.

Colas R., Cabaud R., Vivier P. (1968). -Dictionnaire technique de l'eau et des questions connexes. Ed. G. Le Prat, Paris.

COLLIN J.J. (2004). Les eaux souterraines. Connaissance et gestion. D'après "Les eaux souterraines. Connaissance et gestion" J.J. Collin - 2004. Editions BRGM.

Darcy H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris.

Daubrée A. (1887). Les eaux souterraines à l'époque actuelle. Paris.

Detay, M. (1997). La gestion active des aquifères. Masson Paris, 416 p.

Detay, M. Le forage d'eau : réalisation, entretien et réhabilitation. Masson. Paris, 1993. 379 p.

François Renard. (2007), Hydrogéologie Générale : Master professionnel eaux souterraines : Cours d'hydrogéologie . octobre 2007. p49.

G. Castany, J. Margat. (1977), Dictionnaire français d'hydrogéologie . Éditions du BRGM.

Gelis E. (1956), Eléments d'hydraulique souterraine. N. mém. Serv. géol. Maroc, no 136, Rabat.

Gilli Eric, Mangan Christian, Mudry Jacques. (2004), Hydrogéologie : objets, méthodes, applications. Dunod, Paris, 2004. 303 p.

Héricart de Thury. (1829), Considérations géologiques et physiques sur la cause du jaillissement des eaux des puits forés ou fontaines artificielles. Paris.

INPE, Institut National de Perfectionnement de l'Équipement .

J.Person. (1980), le forage d'eau, guide pratique des maitres d'ouvrage. Bureau de recherches géologiques et minières. Orléans : BRGM, 1980. 40p.

Laurent Albouy et Jean Jacques. Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11/9/2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau. Edition : MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, septembre 2004. P90.

Imbeaux E. (1930), Essai d'hydrogéologie. Paris.

Mabillet Albert. (1971), LE FORAGE D'EAU, Guide pratique. Naintre : Crépines Johnson-France SA, 1971. 237p.

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

Maillet E. (1905), Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Paris.

Marguat.J. (1972), Terminologie hydrogéologique. Edition BRGM.

Marsily, G. (1981), Hydrogéologie Quantitative. Masson, Paris., 214 p.

Mayer A. (1947), Les terrains perméables. Paris.

Mehdi Metaiche. (2013), FORAGE : TECHNIQUES ET PROCÉDES. Université de Bouira, Octobre 2013.P61.

Normand M. (2003), Mise en oeuvre de la DCE. Identification et d'élimination des masses d'eau souterraine. Guide méthodologique. Rapport BRGM/RP-52266-FR.

O. Dureau. (2007), Entretien préventif du forage de la Mance, Fait à Amanvillers le 08/03/2007,P 07.

Olivier Banton et Lumony M.Bangoy .(1997), Hydrogéologie, multiscience environnementale des eaux souterraines, AUPELF - UREF et Presses de l'Université du Québec.1997.460p.

Paramelle Abbé. (1856), L'art de découvrir les sources. Paris.

Perrault P. (1674), De l'origine des fontaines. Paris.

Petit V., Hanot F., Pointet T. (2003), Référentiel hydrogéologique BD RHF. Guide méthodologique de découpage des entités. Rapport final. Rapport BRGM/RP-52261-FR.

Pochet L. (1905), Etude sur les sources. Hydraulique des nappes aquifères et des sources, et applications pratiques. Paris, (Minist. agric.).

R.Degallier. (1985), Colmatage Des Puits Et Forages : Manuel Pratique. Bureau de recherches géologiques et minières. Orléans : BRGM, 1985. 39p.

Robert Mardini.(2012), revue technique réalisation et rehabilitation de forages dans les conditions du terrain. mars 2012.p 137.

Samsoen. (1941), Les eaux souterraines dans les territoires du Sud. Bull. Serv. Carte géai. Algérie, no 6.

Schneebeli G. (1955). Expériences sur la limite de validité de la loi de Darcy et l'apparition de la turbulence dans un écoulement de filtration. Houille Blanche Fr., n°2.

Schneebeli G. (1966). Hydraulique souterraine. Paris, Eyrolles.

Schoeller H. (1955). Hydrogéologie. Paris. Ec. nat. sup. pétrole, 1949, éd. Technip.

Références Sito-Graphiques :

[1]<http://www.boniface-51.com>. Consulte Le 1/09/2014.

[2]<http://www.bretagne-forage.com>. Consulte Le 1/09/2014.

[3]<http://www.brgm.fr>.

[4]<http://www.cotrasol.fr>. Consulte Le 24/10/2014.

[5]<http://www.eau-forte.com>. Consulte Le 1/09/2014.

[6]www.geopro.be.

[7]<http://www.hydroinvest.com>.

[8]<http://www.ideeseaux.com>. Consulte Le 02/09/2014.

[9]www.johnsonscreens.com.

[10]<http://www.sb2o.com>.

ANNEXES :

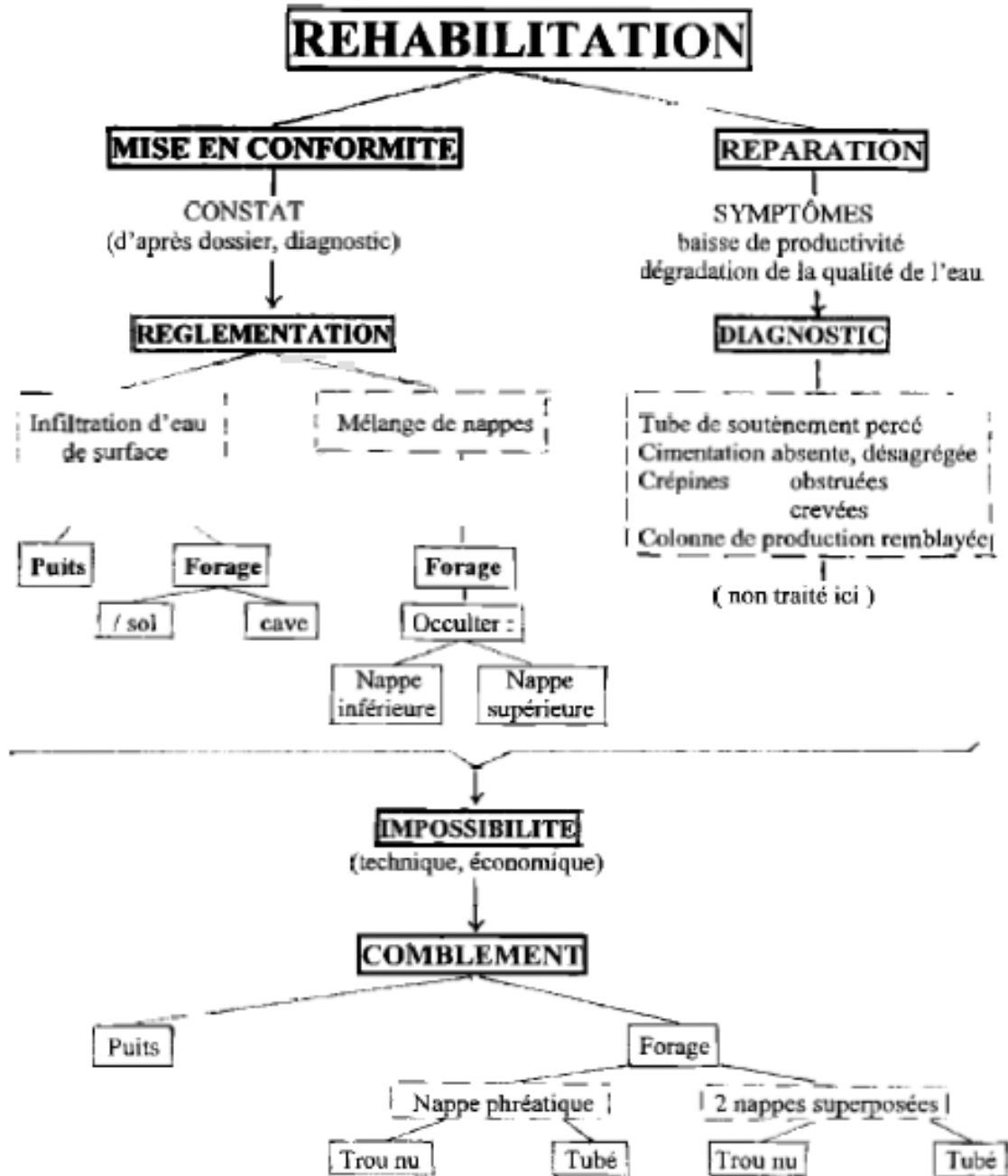
ANNEXE N°2 :

Exemple de fiche des données d'un essai de pompage. (Robert Mardini, 2012)

[NOM DE L'ORGANISATION]		FICHE D'ESSAI DE POMPAGE PAR PALIERS DE DÉBIT							
[PROJET/CONTRAT]		ENTREPRENEUR :							
Forage n° :		Emplacement/coordonnées :				Altitude :			
Forage nouveau/réhabilité		Profondeur du forage :				Niveau statique :			
Pompe utilisée pour l'essai :		Profondeur de l'aspiration :				Données du test :			
Pompe existante :		Responsable de l'essai :				Date de l'essai :			
Durée du pompage (min.)	PHASE 1 (1 heure)		PHASE 2 (1 heure)		PHASE 3 (1 heure)		PHASE 4 (1 heure)		Remontée (Rabattement résiduel) (m)
	Rabattement (m)	Débit (unités)	Rabattement (m)	Débit (unités)	Rabattement (m)	Débit (unités)	Rabattement (m)	Débit (unités)	
0,5									
1									
1,5									
2									
2,5									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
12									
15									
20									
25									
30									
40									
50									
60									
70									
80									
90									
100									
120									
Remarques :									

ANNEXE N°1 :

**SCHEMA-ORGANIGRAMME
SYNTHETIQUE**



(Source Ph. Maget, 2002)