

Chapitre II

Les puits de forage

Introduction

Les puits en général sont des ouvrages permettant de capter l'eau d'un aquifère. On distingue les puits ordinaires et les puits de forage par leurs dimensions. Les puits ordinaires ont un grand diamètre et une profondeur faible ; alors que les puits de forage sont de petits diamètres et des grandes profondeurs.

La construction d'un puits (ordinaire ou forage) consiste à percer le sol en traversant la nappe aquifère afin de capter son eau. Les conditions à satisfaire pour la construction d'un puits sont:

- La protection des parois contre l'éboulement.
- L'obtention du débit maximum.
- La protection du puits contre la pollution.

Cependant les techniques de construction des puits diffèrent suivant que l'on a affaire à :

- Un puits ordinaire, ou un puits de forage.
- Un forage peu ou trop profond
- Un sol meuble ou consolidé ...

II.1. Etapes de construction d'un forage

La construction d'un puits de forage comporte les mêmes principes que pour la construction des puits ordinaires ; cependant les forages nécessitent une technologie plus élaborée du fait que leur profondeur est trop grande et peuvent traverser des terrains de caractéristiques variés. En effet les puits ordinaires ne sont creusés que pour le captage des nappes phréatiques peu profondes. Les forages doivent donc traverser une épaisseur de terrain plus ou moins dure avant d'atteindre le toit de la nappe ciblée par le forage.

Lorsque la nappe ciblée par le forage est peu profonde et que les terrains traversés sont bien consolidés, le forage peut être construit avec un diamètre uniforme, comme dans le cas des puits ordinaires.

Lorsque la nappe est profonde ou bien que les terrains traversés soient meubles on doit exécuter le forage avec plusieurs diamètres. On parle alors de forage télescopique. [14]

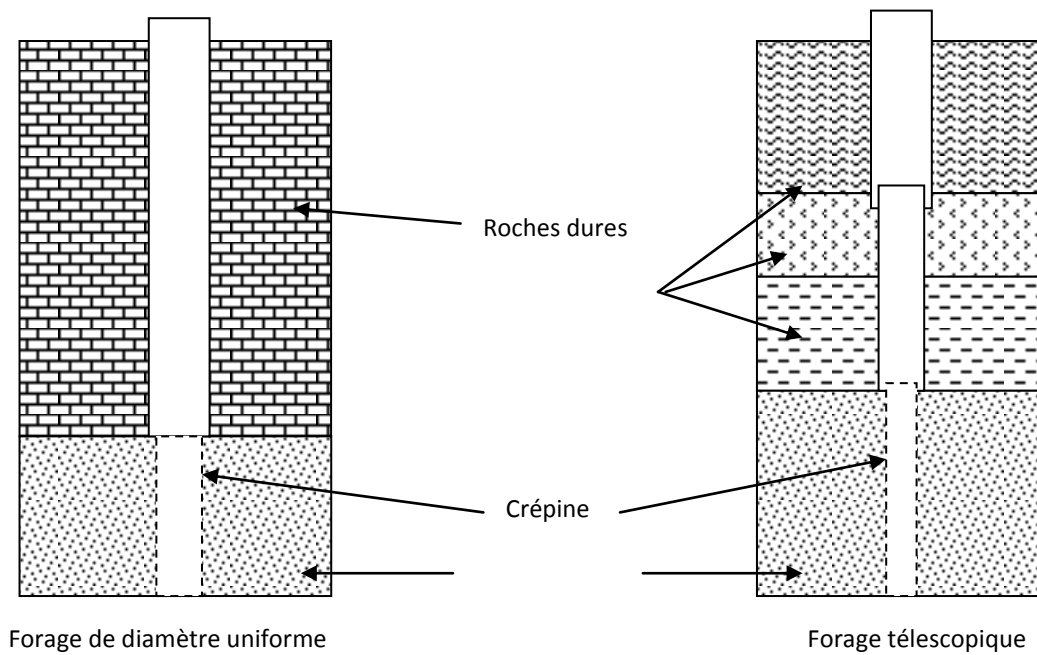


Figure II.1. Forage De Diamètre Uniforme Et Forage Télescopique

II.2. Equipement des forages

La mise en place de l'équipement d'un forage d'exploitation d'eau potable exige, une attention particulière pour un strict respect des règles de l'art. Les nombreuses informations accumulées lors du suivi de foration, sur la nature du fluide, réservoir, et de l'encaissant vont permettre d'optimiser la colonne de captage prévue initialement dans le cahier des charges. L'équipement définitif de forage d'exploitation d'eau potable, doit répondre aux contraintes liées aux caractéristiques de la ressource, du forage et aux objectifs de production, et doit aussi garantir une longévité à cet ouvrage.

II.2.1. Tubage plein

Il a pour fonction, de canaliser l'eau depuis la ressource jusqu'en surface, de tenir mécaniquement les terrains traversés, de permettre la fixation du matériel de tête d'ouvrage (support de pompe, raccordement au réseau de surface). Le diamètre du ou des différents tubages sera lié à la profondeur finale, à la nature des terrains traversés et au débit de production espéré. Les tubages peuvent être provisoires (recouverts par l'équipement définitif) ou définitifs (servant de canalisation), et dans ce cas un diamètre uniforme sera préféré.

Outre les matériaux, les tubages se caractérisent par leur diamètre, leur épaisseur et leurs techniques d'assemblage, (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.

Au moment de la pose il y a lieu de vérifier :

Que le matériel soit nettoyé et désinfecté avant d'être mis en place. Que les côtes prévues de mise en place soient respectées, et en particulier que les superpositions de tubage dans les télescopes soient suffisantes. Que l'assemblage soit fait dans les règles de l'art. Que le tubage ne soit pas endommagé lors de sa mise en place.

Une inspection vidéo permettra de visualiser la mise en place correcte du tubage suivant les spécifications, l'état général de ce dernier et l'étanchéité apparente des raccords soudés ou filetés.

II.2.2. Crépine

La crépine est un tube ajouré laissant le passage à l'eau tout en maintenant la formation. En tant qu'interface avec la nappe, elle constitue l'élément principal de l'équipement d'un ouvrage d'exploitation. Sa longueur, son type, sa nature sont directement fonction de l'épaisseur de la formation à capter, du niveau de rabattement maximal et de la nature de l'aquifère. Elle devra répondre aux critères suivants :

- Permettre la production de fluide sans particule fine,
- Rester inerte vis à vis du fluide à capter,
- Resister à la pression d'écrasement exercée par la formation aquifère en cours d'exploitation,
- Ne pas risqué un vieillissement prématuré,
- Induire des pertes de charges minimales.

Une crépine se caractérise par :

- par la nature du matériau qui la constitue,
- par la forme des ouvertures et la taille des ouvertures,
- par le coefficient d'ouverture.

Les caractéristiques géométriques (taille, densité et forme des ouvertures) dépendent de la nature et des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère définies lors du suivi de forage (analyse granulométrique, diagraphie...). Dans certains types de terrain très consolidés comme les carbonates ou les terrains cristallins, la présence de crépine n'est pas forcément utile, elle peut induire une augmentation des pertes de charges. Deux types de crépines sont fréquemment utilisés :

Les crépines perforées (à trous oblongues, à nervures repoussées, ou à fentes rectangulaires pour le PVC). Le coefficient d'ouverture est limité de 10 à 20 %.

Les crépines à fente continue sur toute la longueur de la crépine, obtenue par enroulement hélicoïdal d'un "fil enveloppe profilée" soudé sur des génératrices métalliques verticales. Le coefficient d'ouverture est nettement supérieur (jusqu'à 50 %).



Figure II.2. Différents types de crépine

Les ouvrages de captage dans leur majorité sont de l'un des deux types suivant :

- Ouvrage à Equipment monolithique (1 seul diamètre), les crépines sont alors descendues au bout des tubages pleins,
- Ouvrage télescopé à crépine de diamètre inférieur à celui du tubage d'occultation des niveaux supérieurs.

- L'assemblage des crépines se fait soit par filetage ou par soudage. La présence de crépines simplement posées en fond de trou est à proscrire dans la mesure du possible car ceci peut être la cause de by-pass par circulation dans l'annulaire.

II.2.3. Massif filtrant

Il s'agit de mettre en place, entre la crépine et l'aquifère, un massif de gravier dont la granulométrie doit être élevée (limitation de perte de charge) tout en assurant une filtration efficace. La mise en place de ce massif permet d'augmenter la taille des ouvertures des crépines (ou slot), de réduire la vitesse de circulation de l'eau à l'entrée de la crépine et donc d'augmenter le débit de production ainsi que la longévité de l'ensemble.

Le massif sera constitué d'un matériau propre sans élément fin, de forme arrondie pour limiter les pertes de charge. Enfin, il sera caractérisé par une granulométrie précise définie à partir de la granulométrie de l'aquifère.

Lorsque la granulométrie de l'aquifère est grossière, il ne sera pas nécessaire de mettre en place de massif filtrant artificiel. Par contre, lorsque dans les aquifères consolidés ou semis consolidés, présentent des risques d'éboulements, la mise en place d'un massif de blocage n'a pas un effet de filtre mais de soutènement.

Dans le cas d'un forage peu profond, le massif de gravier est introduit entre le tube d'extension de la crépine et le tube de protection qui est remonté au fur et à mesure du remplissage annulaire par le gravier. Dans le cas d'un forage profond, le massif de gravier est mis en place par un circuit continu sous pression.

II.2.4. Développement

Le développement d'un forage consiste à améliorer la productivité de la formation aquifère située autour de la crépine et à stabiliser cette formation. Cette opération s'effectue le plus souvent lorsque la colonne de captage est en place avant la mise en production du forage.

Les types de développement les plus couramment utilisés sont :

- le développement à l'air lift ou émulseur. Il s'agit de stimuler alternativement le forage par injection d'air filtré créant un phénomène, de flux et de reflux dans le réservoir.
- le développement par pistonage,
- le développement par pompage alterné, et sur pompage,
- le développement par adjonction de produit chimique, le plus fréquent étant l'acide chlorhydrique utilisé dans les terrains carbonatés. Il est utilisé des polyphosphates pour des réservoirs à tendance argileuse, ou d'autres types d'acide et mélange au cas par cas.

Cette méthode nécessite le traitement des effluents avant rejet des eaux d'exhaure dans l'environnement.

II.2.5. Nettoyage et désinfection

Dans le cadre d'un forage d'eau potable cela nécessite un nettoyage et une désinfection du matériel et des matériaux introduits dans l'ouvrage à demeure ou en provisoire et des mesures d'hygiène renforcées de la part des intervenants sur site. [15]

-Exemple de forages équipés

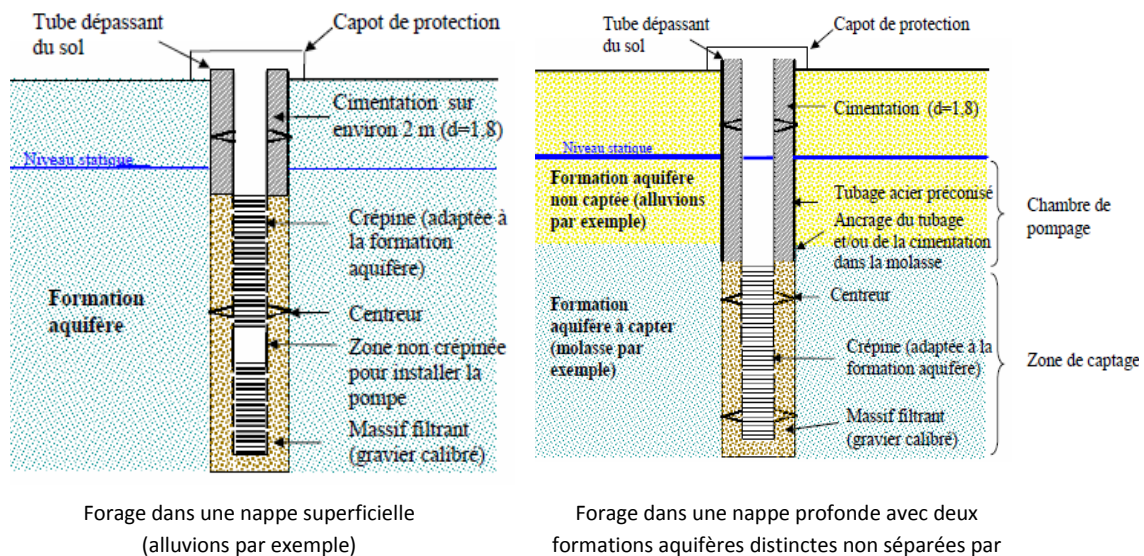


Figure II.3. Exemples de forages équipés

II.3. Essais de pompages

Lorsque la construction d'un puit est achevée, il faut lui faire subir des essais de pompage (ou essais de débit), établir sa courbe caractéristique et en déterminer son débit d'exploitation. Un pompage d'essai a deux buts principaux.

On peut d'abord l'exécuter pour déterminer les caractéristiques hydrauliques d'un aquifère. C'est ce qu'on appelle souvent un "**essai de nappe**", Mais on peut aussi exécuter un pompage d'essai pour obtenir des renseignements sur les caractéristiques du puits. On peut alors déterminer le débit spécifique du puits, égal au rapport du débit sur le rabattement, pour choisir ainsi le type de pompe et estimer le coût du pompage. Le débit spécifique est une façon de mesurer la productivité du puits. Dans ce cas, on baptise l'essai "**essai de puits**", puisque l'on teste davantage le puits que la nappe.

Le principe d'un essai de nappe consiste à pomper un certain débit durant un temps donné dans le puits d'essai crépine à travers l'aquifère. On mesure l'influence de ce pompage sur le

niveau piézométrique dans ce puits et dans quelques piézomètres installés au voisinage. On peut alors calculer les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère en appliquant des formules appropriées sur les rabattements mesurés dans les piézomètres, leur distance au puits et le débit de pompage.

La démarche à suivre pour un essai de puits dont on veut connaître le rendement est encore plus simple que pour un essai de nappe, car on n'a pas besoin de piézomètre et il suffit de mesurer le débit et le rabattement dans le puits. Pour un essai de puits on exécute un pompage **par palier** alors que dans le cas d'un essai de nappe on fait un pompage de **longue durée**.

II.3.1. Pompage par paliers

Ce type d'essais permet de déterminer les pertes de charges créées par l'équipement du puits au niveau des crépines, de même que l'évolution du débit spécifique (débit par mètre de rabattement) et le débit critique. Le débit critique est le débit au delà duquel le rabattement commence à croître exponentiellement avec le débit. La connaissance du débit critique permet donc de fixer un débit d'exploitation rentable. Les paliers au nombre de 3 ou 4, sont de durée égales, en général de 4 à 8 heures chacune, pendant un palier le débit est constant et les débits sont croissants d'un palier à l'autre. Pour un essai de 4 paliers les débits seront fixés à environs 25, 50, 75 et 100 % du débit maximal. Entre chaque palier, le pompage sera arrêté jusqu'à ce que le niveau d'eau soit pratiquement revenu à sa valeur initiale (niveau naturel).

II.3.2. Pompage de longue durée

Le pompage de longue durée est effectué à débit constant, sa durée est en général comprise entre 24 et 72 heures. L'essai pourra cependant être arrêté avant la fin de la durée prévue si le rabattement se stabilise. Les mesures de niveau sont effectuées à des intervalles de temps rapprochées au début, puis de plus en plus espacé ensuite lorsque les variations de niveau deviennent plus faibles. Le débit de pompage est également mesuré régulièrement. On s'efforce de le garder constant. Après l'arrêt du pompage, on observe également la remontée du niveau. L'interprétation est effectuée à l'aide de logiciels spécialisés.

Le principe de l'interprétation est d'ajuster à la courbe niveau/temps enregistrée (descente et remontée), une courbe théorique calculée en faisant varier les valeurs des caractéristiques et pour différentes hypothèses de conditions limites.

L'essai de longue durée permet donc la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère : la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement. [15]

II.4. Exécution d'un pompage d'essai

Il y a deux sortes de mesures à prendre durant un pompage d'essai:

- Les mesures de niveau d'eau
- Les mesures de débit.

L'installation comporte une pompe, une vanne de réglage du débit, une sonde pour la mesure du rabattement et un débitmètre. L'eau pompée doit être évacuée le plus loin possible du puits pour éviter les retours d'eau par infiltration dans le puits.

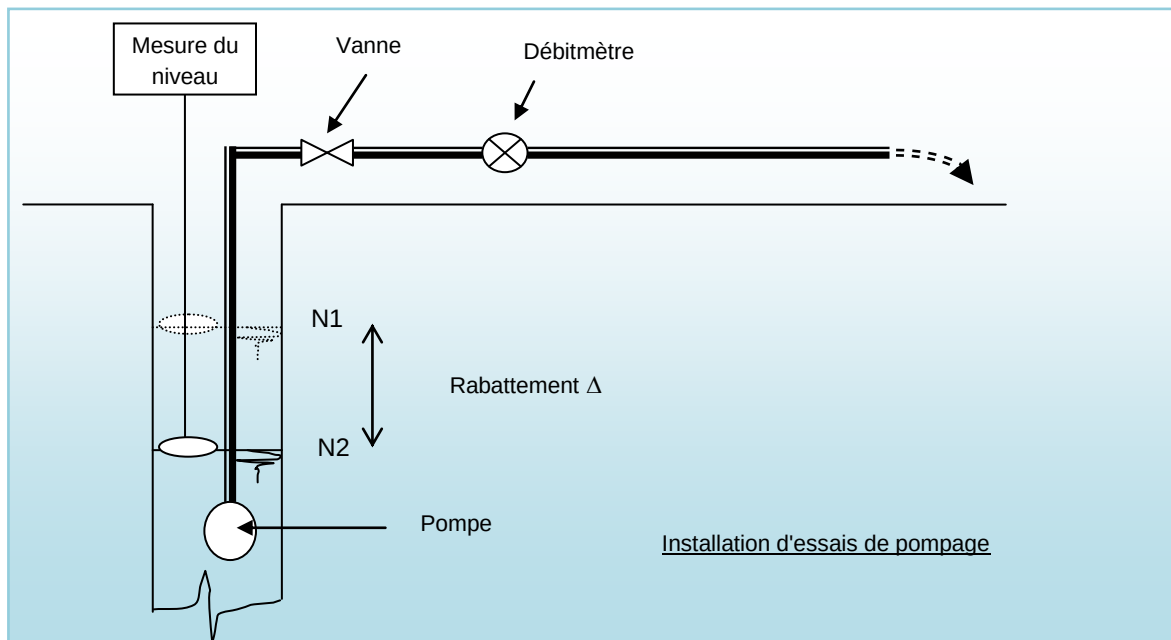


Figure II.4. Installation d'essais de pompage

On commence le pompage avec un faible débit, on attend la stabilisation du niveau dynamique dans le puits et on note soigneusement le rabattement Δ correspondant à ce débit. On recommence l'opération avec un débit supérieur et on note le rabattement correspondant à la stabilisation du niveau et ainsi de suite jusqu'au refus de la nappe.

La pompe et le bloc moteur doivent pouvoir travailler sans cesse, 24 heures sur 24, à débit constant et durant au moins deux jours. Cette période est même trop courte quand il s'agit de tester une nappe libre ou semi-libre, ou quand on désire prendre des mesures de rabattement sur des piézomètres lointain. Il faut alors pomper sans arrêt durant plusieurs jours pour obtenir des rabattements mesurables à de telles distances. [16]

II.5. L'essai par palier et détermination des caractéristiques du forage

L'essai par paliers (parfois appelé essai par paliers de rabattement) est conçu pour déterminer le rapport à court terme entre le rendement et le rabattement dans le forage testé.

Il consiste à effectuer une série de pompages à différents débits, pendant des temps relativement courts (normalement, toute la série peut être terminée en un jour). Un essai par paliers peut être réalisé de différentes façons, mais la plus courante est la suivante :

- commencer par un débit de pompage faible, et l'augmenter à chaque palier, sans débrancher la pompe entre les paliers.
- Prévoir quatre à cinq paliers au total, les débits de pompage progressant par échelons plus ou moins réguliers entre le minimum et le maximum.
- Tous les paliers devraient avoir la même durée, la plus courante étant de 60 à 120 minutes.
- Le débit du dernier palier devrait être égal ou supérieur au débit d'exploitation prévu lorsque le forage fonctionnera à pleine capacité. Cela n'est possible, bien sûr, que si la pompe utilisée pour l'essai peut fournir un tel débit.

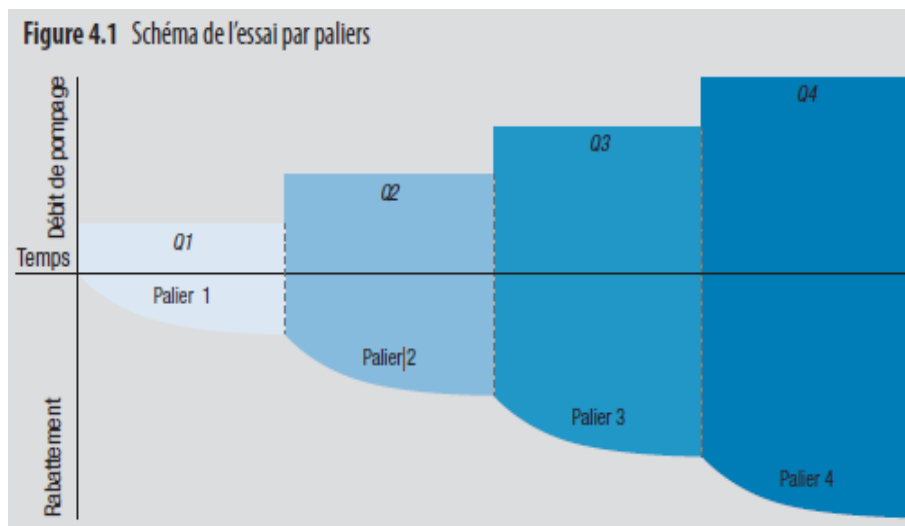


Figure II.5. Schéma de l'essai par paliers

II.5.1. Equipements et limites

Pour effectuer un essai par paliers, l'équipement suivant est nécessaire :

- une pompe motorisée complète, comprenant alimentation, colonne de refoulement, vannes et conduites de refoulement, montés de telle sorte que le débit puisse être modifié pour atteindre les débits voulus pour les différents paliers. La plupart des pompes travaillent à une vitesse fixe, donc généralement, on y parvient en « étranglant » la pompe au moyen d'une vanne, puis en ouvrant progressivement cette dernière pour atteindre des débits de plus en plus grands.
- Un chronomètre pour mesurer le temps de pompage et de remontée.
- Une sonde piézométrique pour mesurer les niveaux d'eau.

- Un dispositif pour mesurer le débit de pompage (seau et chronomètre, débitmètre, etc.).
- Un carnet, ou un formulaire standard, et un crayon pour consigner les données de l'essai.
- Du papier millimétré linéaire et une règle pour reporter les résultats.

Comme indiqué ci-dessus, les essais par paliers sont conçus essentiellement pour fournir des informations sur les caractéristiques de performance des forages (rapport rendement – rabattement). Il est possible d'utiliser les résultats d'un essai par paliers pour évaluer la transmissivité d'un aquifère, et les méthodes à employer se trouvent dans les principaux manuels d'hydrogéologie. Le présent guide se concentre sur les performances du forage. Les résultats d'un essai par paliers ne sont pas vraiment appropriés pour prédire le comportement d'un forage lors de pompages à long terme ; pour cela, il vaut mieux effectuer un essai à débit constant.

A) Régler les débits de pompage : le jour précédant l'essai de pompage, il est recommandé d'essayer le réglage des vannes, pour obtenir les débits voulus pour chaque palier.

On utilise en général des robinets vanne ou à soupape réglés manuellement au moyen d'une manette à vis. Fermez totalement la vanne, puis ouvrez-la complètement et comptez le nombre de rotations de la manette entre ces deux positions.

Expérimentez le réglage en faisant un nombre différent de rotations depuis la position fermée, afin d'obtenir les différents débits prévus pour les paliers, et notez les résultats.

B) Choisir la durée du palier : dans la pratique, la durée de chaque palier dépend du nombre de paliers et du temps total disponible pour l'essai (en général une journée), mais 60, 100 ou 120 minutes sont des durées de paliers courantes. Idéalement, le niveau d'eau dans le forage devrait se rapprocher de l'équilibre à la fin de chaque palier, mais ce n'est pas toujours réalisable. Même si le niveau d'eau n'atteint pas l'équilibre à la fin de chaque palier (en d'autres termes s'il continue à baisser lentement), les résultats de l'essai seront tout de même utiles.

Ils donnent un « instantané » des performances du forage dans certaines conditions, et peuvent être comparés aux résultats du même essai (débits et durée des paliers identiques) répété à un autre moment, pour voir si les performances du forage ont changé. Si le niveau d'eau continue à baisser rapidement à la fin du premier palier, on peut décider de prolonger la durée du palier (et d'ajuster les paliers suivants en augmentant aussi leur durée). Vous trouverez plus de détails théoriques et pratiques sur les essais par paliers chez Clark (1977).

II.5.2. Déroulement de l'essai

Une fois que l'équipement est prêt et que les différentes tâches ont été attribuées, l'essai se déroule de la façon suivante :

1. Choisir un point de référence (par ex. le bord supérieur du tubage) à partir duquel tous les relevés du niveau d'eau seront effectués, et mesurer le niveau d'eau résiduel. Le niveau doit être stable avant le début de l'essai, donc celui-ci ne doit pas être réalisé un jour où le forage vient d'être fait ou développé, ou lorsque l'équipement est testé.
2. Ouvrir la vanne au réglage prévu pour le premier palier (fixé lors de l'essai précédemment décrit) et enclencher simultanément la pompe et le chronomètre. Ne modifier pas constamment le réglage de la vanne pour obtenir un débit particulier (par ex. un chiffre rond pour le nombre de litres par minute). Viser plutôt un débit approximatif et mesurez le débit réel.
3. Mesurer le niveau d'eau dans le forage toutes les 30 secondes pendant les 10 premières minutes, puis toutes les minutes pendant 30 minutes, et enfin toutes les 5 minutes jusqu'à la fin du palier (la durée de chaque palier ayant été fixée lors des préparatifs de l'essai). Si on oublie de mesurer le niveau d'eau au moment prévu, noter précisément l'heure à laquelle le relevé est effectué.
4. Mesurer le débit de pompage juste après le début du palier, puis à intervalles réguliers (toutes les 15 minutes paraît raisonnable). S'il y a une accélération nette du rabattement, ou si la pompe fait un bruit différent, mesurer le débit à ces moments-là également. Si le débit de pompage change de manière significative (plus de 10 %), ajustez la vanne pour maintenir un débit aussi stable que possible durant tout le palier. Veiller à ne pas trop corriger, ce qui aggraverait encore le problème.
5. A la fin du 1er palier, ouvrir la vanne jusqu'au réglage prévu pour le 2ème palier, noter l'heure (ou redémarrez le chronomètre) et répétez les mesures du niveau d'eau et du débit de pompage.
6. Répéter la procédure pour les paliers suivants, en augmentant progressivement le débit de pompage à chaque palier.
7. A la fin du dernier palier débrancher la pompe, noter l'heure (ou redémarrer le chronomètre) et mesurer la remontée du niveau d'eau aux mêmes intervalles que ceux auxquels on a mesuré le rabattement lors de chaque palier. Continuer jusqu'à ce que le niveau d'eau se rapproche du niveau enregistré avant l'essai.

II.5.3. Analyse et interprétation

Les résultats d'un essai par paliers peuvent être analysés de différentes façons, dont certaines sont très complexes, mais le présent travail décrit des méthodes simples qui se concentrent sur les performances du forage.

II.5.3.1. L'équation de JACOB

La théorie de l'hydraulique des eaux souterraines présuppose que pendant le pompage dans un forage, les conditions de flux dans l'aquifère sont laminaires. Si c'est effectivement le cas, le rabattement dans le forage est directement proportionnel au débit de pompage.

Toutefois, des turbulences peuvent se produire dans l'aquifère à proximité du forage si le pompage se fait à un débit suffisamment élevé ; en outre, dans le dernier trajet, lorsque l'eau passe de l'aquifère au forage et à la pompe à travers le massif filtrant et la crépine, l'écoulement devient presque toujours turbulent. Ceci entraîne des « pertes de charge » dans le puits, ce qui signifie qu'un rabattement supplémentaire est nécessaire pour que l'eau entre dans la pompe. Si l'eau est agitée par des turbulences, Jacob propose d'exprimer le rabattement dans le forage par l'équation suivante (expliquée en détail dans Kruseman et de Ridder (1990) :

$$s = BQ + CQ^2 \quad \text{II.1}$$

Où s est le rabattement, Q le débit de pompage et B et C des constantes. Si tous les termes de l'équation II.1. Sont divisés par Q , on obtient :

$$s/Q = B + CQ \quad \text{II.2}$$

Qui est l'équation d'une ligne droite (si s/Q est reporté en fonction de Q sur du papier millimétré linéaire). Notez que s/Q désigne le rabattement spécifique, et l'inverse (Q/s) la capacité spécifique. Donc, pour analyser les résultats des essais par paliers, procédez de la manière suivante :

1. Calculez le débit de pompage moyen pour chaque palier de l'essai (prenez toutes les mesures du débit enregistrées pendant le 1er palier et calculez la moyenne ; répétez le processus pour les autres paliers). Si l'essai comporte cinq paliers, vous devez obtenir cinq valeurs pour le débit de pompage (Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 et Q_5).
2. Prenez les relevés du niveau d'eau enregistrés à la fin de chaque palier (en mètres au-dessous du point de référence) et convertissez-les en rabattement en soustrayant le niveau d'eau résiduel.
• nouveau, pour un essai à cinq paliers, vous devriez obtenir cinq valeurs de rabattement (s_1 , s_2 , s_3 , s_4 et s_5).
3. Calculez le rabattement spécifique au moyen des couples (s_1/Q_1 , s_2/Q_2 , etc.). Puis dessinez un graphique de s/Q en fonction de Q sur du papier millimétré linéaire (en traçant s_1/Q_1 en fonction de Q_1 , s_2/Q_2 en fonction de Q_2 , etc., comme le montre la figure II.6. ci dessous. Tracez la droite la mieux ajustée passant par les points le Les valeurs de B et C peuvent ensuite être utilisées dans l'équation II.1 ci-dessus pour calculer le rabattement escompté pour les autres débits ou, en adaptant légèrement l'équation, le débit attendu pour un rabattement donné. Si l'essai par paliers est répété à une date ultérieure et que la droite la mieux ajustée (sur la figure

II.6) s'est déplacée verticalement (B différent) mais que la pente est la même (C), cela indique un changement de l'état de l'aquifère. Si B est resté identique mais que C a augmenté, la performance du forage s'est détériorée, probablement en raison d'un facteur tel que l'obstruction de la crépine.

L'équation de Jacob est souvent utilisée pour calculer l'efficacité du forage, mais cette notion suscite une grande confusion, et la réalité est beaucoup plus complexe. Il est préférable d'utiliser l'analyse des résultats de l'essai par paliers pour essayer de comprendre les caractéristiques de la performance du forage, comme décrit ci-dessous.

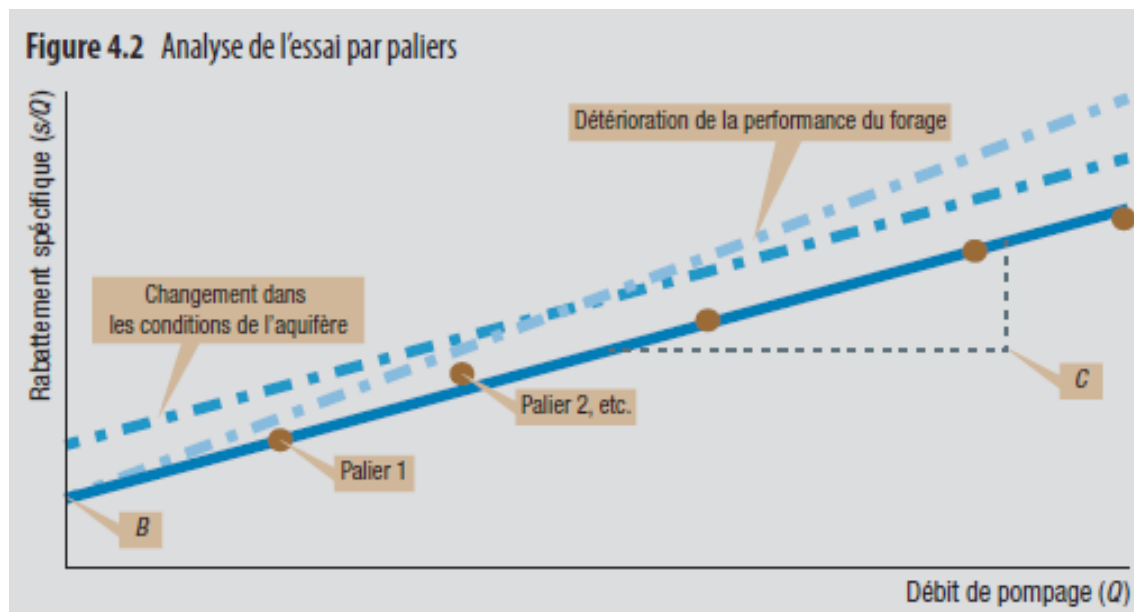


Figure II.6. Analyse de l'essai par paliers

II.5.3.2. Courbes caractéristiques du forage

La meilleure façon de représenter la performance du forage est de tracer des courbes sur un graphique en reportant le niveau d'eau en fonction du débit de pompage. On utilise les niveaux d'eau (en mètres au-dessous du point de référence) au lieu des rabattements afin de pouvoir tracer les variations saisonnières sur le même graphique si un nouvel essai est effectué à une autre période de l'année. Ce genre de graphique est un outil très utile pour gérer les forages : en plus des données des essais de pompage, on peut y reporter des données d'exploitation et diverses contraintes. La procédure est la suivante :

1. Préparez un graphique avec les débits de pompage sur l'axe x et les niveaux d'eau sur l'axe y inversé, comme indiqué à la figure II.7. Reportez le niveau d'eau résiduel (mesuré juste avant le début de l'essai de pompage) en fonction d'un débit de pompage de zéro.
2. Prenez les niveaux d'eau relevés à la fin de chaque palier (en mètres au-dessous du point de référence) et reportez-les en fonction du débit de pompage moyen de chaque palier (Q_1 , Q_2 ,

etc.). Tracez une courbe régulière par ces points (niveau d'eau résiduel inclus). Vous obtenez la courbe de performance spécifique à ce forage ; elle peut être utilisée pour prédire le rabattement à d'autres débits de pompage, et inversement.

3. Si vous voulez utiliser le graphique comme outil de gestion, gardez-le comme référence et mettez-le à jour en y portant les données d'exploitation (points isolés sur le graphique) chaque fois que vous visitez le forage. Vous obtiendrez une image du comportement typique du forage à différents moments de l'année (les points doivent être assortis d'une date). Si possible, introduisez diverses contraintes dans le graphique, sous forme de droites verticales ou horizontales. Les lignes verticales représentent les facteurs qui limitent le débit de pompage, tels que : capacité maximale de la pompe installée, débit de pompage

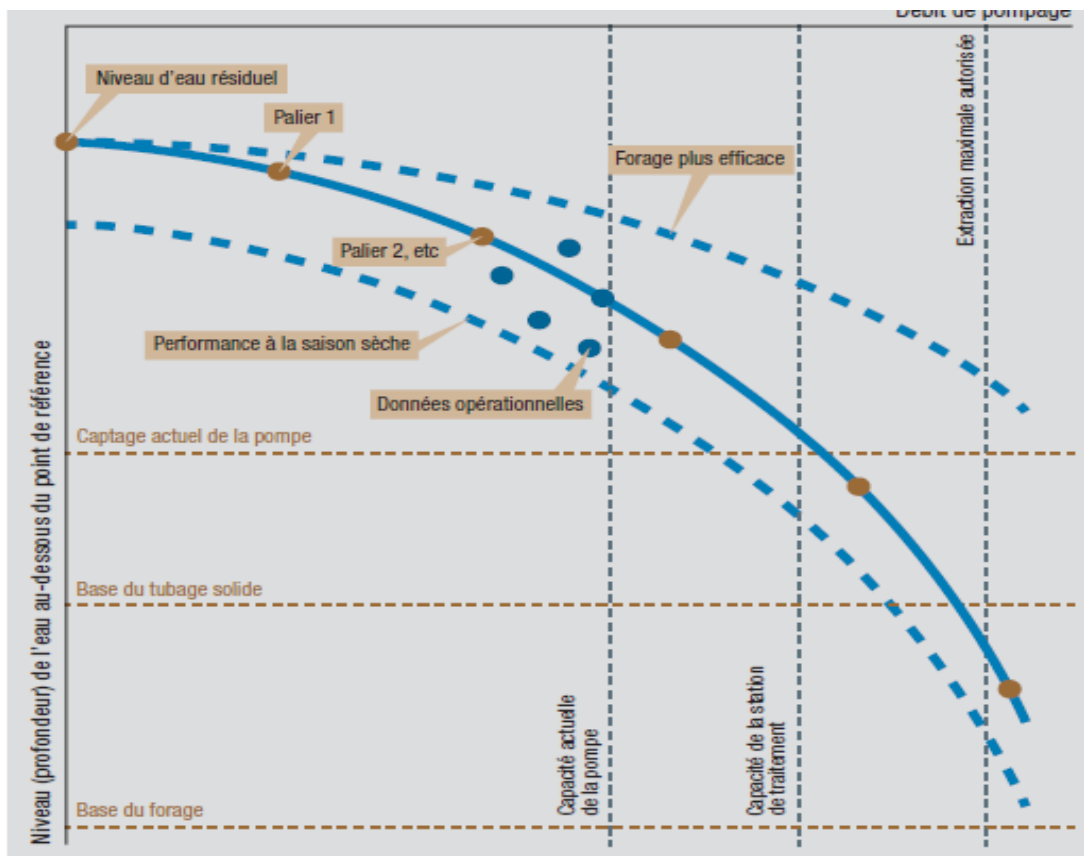


Figure II.7. Diagramme De Performance Du Forage

Maximal autorisé (si l'extraction est soumise à un système de licences dans la région), capacité d'une station de traitement de l'eau, ou capacité d'une pompe de surpression en aval.

Les lignes horizontales représentent des facteurs qui limitent la hauteur de l'eau dans le forage, tels que : profondeur de l'admission de la pompe installée, base du tubage solide ou profondeur totale du forage. Ce graphique aide l'exploitant du forage à visualiser d'un coup d'œil les facteurs qui peuvent influencer les décisions de gestion, par ex. : le forage fournirait-il

plus d'eau si l'admission de la pompe était placée plus bas, ou si une plus grande pompe était installée. La forme de la courbe peut aussi révéler de nombreuses informations. Un forage « efficace » aura une courbe plus plate (voir figure II.7), parce qu'il peut assurer un débit de pompage donné avec un rabattement moindre que ne le ferait un forage moins performant. La pente de certaines courbes s'infléchit très fortement au-dessus d'un certain débit de pompage (comportement parfois désigné par le terme de « point d'inflexion »), indiquant que le forage se rapproche de ses limites et qu'il serait sage de maintenir le débit au-dessous de ce point critique. La courbe est donc un outil pratique pour déterminer la productivité optimale du forage. Si l'essai de pompage est répété à un autre moment de l'année ou quelques années plus tard, des changements dans l'emplacement ou la forme de la courbe peuvent aider à diagnostiquer des problèmes, tels que le colmatage de la crépine (qui redresserait la courbe, puisque le rabattement devrait être plus important pour maintenir un certain débit de pompage) ou des modifications du comportement de l'aquifère (qui déplaceraient la courbe verticalement). La figure II.8 montre les résultats d'un essai par paliers sur plusieurs années qui révèlent une détérioration progressive de la productivité d'un forage dans un aquifère alluvial fortement exploité. Le rendement maximal est passé de 60 à 10 litres par seconde entre 1964 et 1984, alors que la hauteur manométrique a augmenté de 15 à 55 mètres. La détérioration était principalement due au dénoyage de l'horizon aquifère le plus productif.

Il est important de se rappeler que les essais de pompage se font sur des durées relativement courtes et qu'il faut considérer les résultats avec prudence, surtout si le niveau d'eau n'a pas atteint l'équilibre (baisse encore) à la fin de chaque palier. Les données provenant d'essais répétés sont beaucoup plus utiles pour une comparaison si les essais sont effectués exactement de la même façon, avec des paliers de même durée et des débits de pompage semblables. Pour avoir une bonne idée de la performance à long terme d'un forage, rien ne peut remplacer un essai à débit constant, qui est le sujet du chapitre suivant. [17]

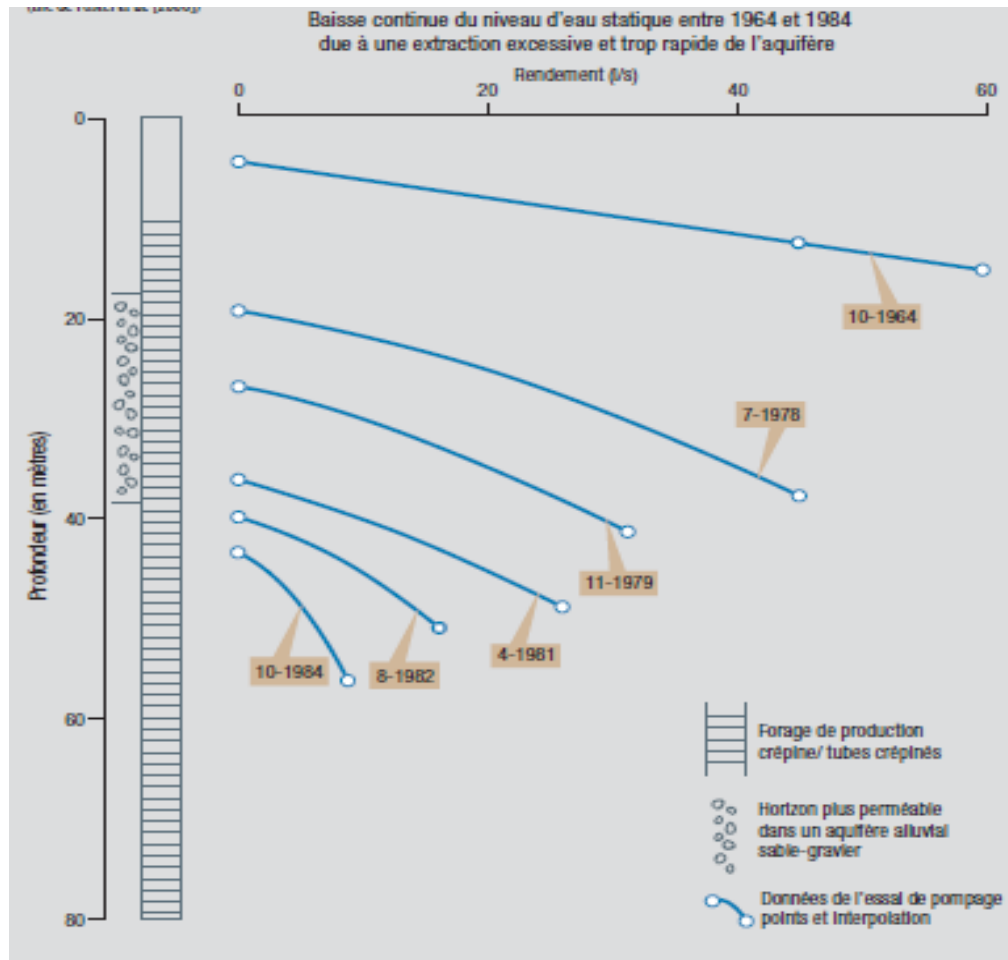


Figure II.8. Détérioration Du Forage

II.5.3.3. Exemple d'essai par palier

Lors de cet essai, une série de paliers (pompage 1 h et remontée 1 h) de débit a été exécutée. Les débits de pompage ont varié de 2,0 à 13,7 m³/h. Afin de parfaire les informations recueillies, le tableau des résultats a été complété d'un cinquième palier correspondant aux valeurs de l'essai de pompage longue durée au bout d'une heure de pompage.

Les résultats des essais par paliers de ce forage sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.1. Essais par paliers de ce forage

Date	Heure	tp	Niveau/sol	Rabatt corrigé-a	Débit M ³ /h	Cond μS/ca	Observation
26/02/1991	09:00	00'00	3.14	0.00			Mesure de débit au fuit de 2001
		00'30	4.40	1.26			
		01'00	4.46	1.32			
		02'00	4.51	1.37			
		03'00	4.54	1.40			
		04'00	4.57	1.43			
		05'00	-	-			
		06'00	4.54	1.40			
		07'00	4.55	1.41			
		08'00	4.56	1.42			
		09'00	4.57	1.43			
		10'00	4.58	1.44			
		12'00	4.595	1.455			
		14'00	4.615	1.475	8.6	210	
		16'00	4.625	1.485			
		18'00	4.63	1.49			
		20'00	4.64	1.50			
		25'00	4.65	1.51	8.6	212	
		30'00	4.67	1.53			
		35'00	4.68	1.54			
		40'00	4.70	1.56	8.6	180	
		45'00	4.705	1.565			
		50'00	4.715	1.575	8.6	192	
		55'00	4.725	1.585			
	1H00	1H00	4.735	1.595			

A partir de ces données, on peut tracer la courbe caractéristique du forage : $S = f(Q)$

Et la courbe : $S/Q = g(Q)$

Afin de déterminer les paramètres B et C de l'équation théorique du rabattement : $S = BQ + CQ^2$

B : représente le coefficient des pertes de charge linéaires (dues au milieu aquifère, au remaniement des terrains autour des crépines...),

C : est le coefficient des pertes de charge quadratiques (dus à l'écoulement turbulent de l'eau dans les crépines au passage des ouvertures, et éventuellement dans le massif filtrant et au voisinage immédiat de celui-ci).

Tableau II.2. Tracée de la caractéristique $S = BQ + CQ^2$

Palier	Durée de pompage (min)	Débit moyen	Rabatt final (m)	Rabatt spécifique
1	60	2	0.31	0.155
2	60	8.6	1.58	0.184
3	60	5.4	0.98	0.181
4	60	12.9	2.56	0.198
5	60	13.7	2.68	0.196

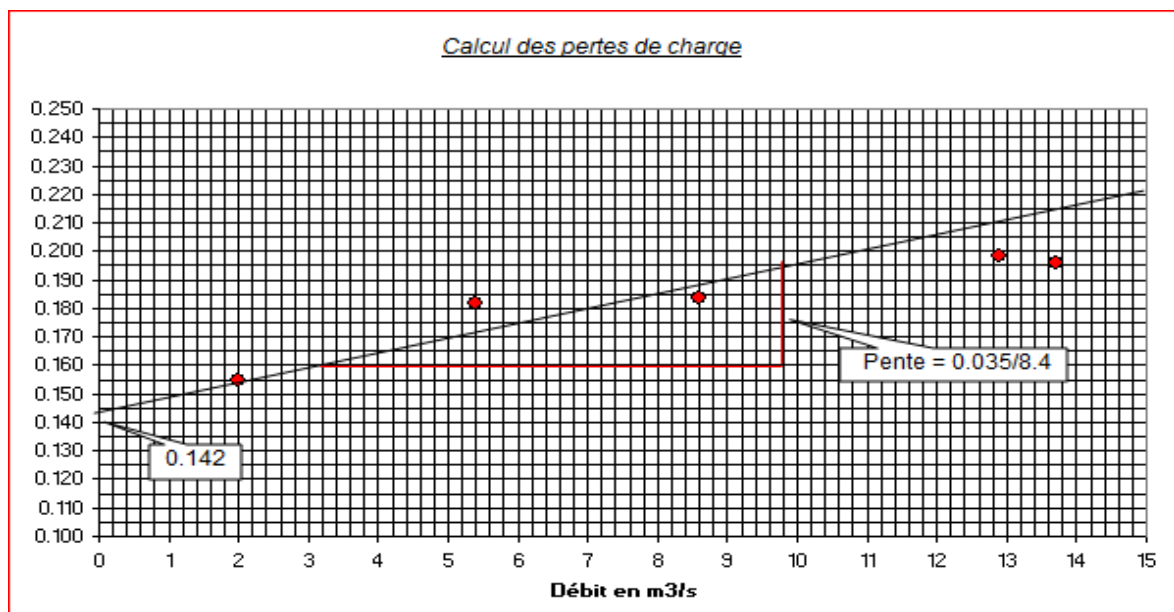


Figure II.9. Courbe caractéristique forage F1

$$B = 0.142$$

$$C = 0.0042$$

Pour les différents débits testés (de 2,0 à 13,7 m³/h), les pertes de charge linéaires sont, théoriquement, supérieures aux pertes de charge quadratiques, ceci atteste de l'absence d'anomalie majeure lors de l'exécution de l'ouvrage, et donc de la qualité des travaux effectués.

Le débit critique est approché sur un graphique $S = f(Q)$ à partir de l'augmentation de la pente de la courbe $S = BQ + CQ^2$; on estime qu'il est atteint quand les pertes de charges linéaires égalent les pertes de charge quadratiques. A ce débit, la vitesse de circulation de l'eau dans les crépines atteint sa valeur critique et l'écoulement devient turbulent.

Ce régime turbulent augmente de façon notable les pertes de charge quadratiques diminuant par la même le rendement de l'ouvrage. En outre, il peut provoquer un entraînement de particules fines du terrain et un colmatage de la partie captant.

Pour le forage FI, ce débit n'a pas été atteint ; en effet, au débit maximum testé (13,7 m³/h), les pertes de charge linéaires (après 1 h de pompage) représentent 71 % des pertes de charge totales. Par extrapolation sur la courbe $S = f(Q)$ on peut estimer, sous toutes réserves que le débit critique est de l'ordre de 33 m³/h et que lui correspond un rabattement théorique de 9,2 m.

Tableau II.3. La caractéristique de rabattement forage F1

Q	BQ	CQ^2	S
2	0.284	0.0168	0.3008
8.6	1.2212	0.3106	1.531832
5.4	0.7668	0.1225	0.889272
12.9	1.8318	0.6989	2.530722
13.7	1.9454	0.7883	2.733698

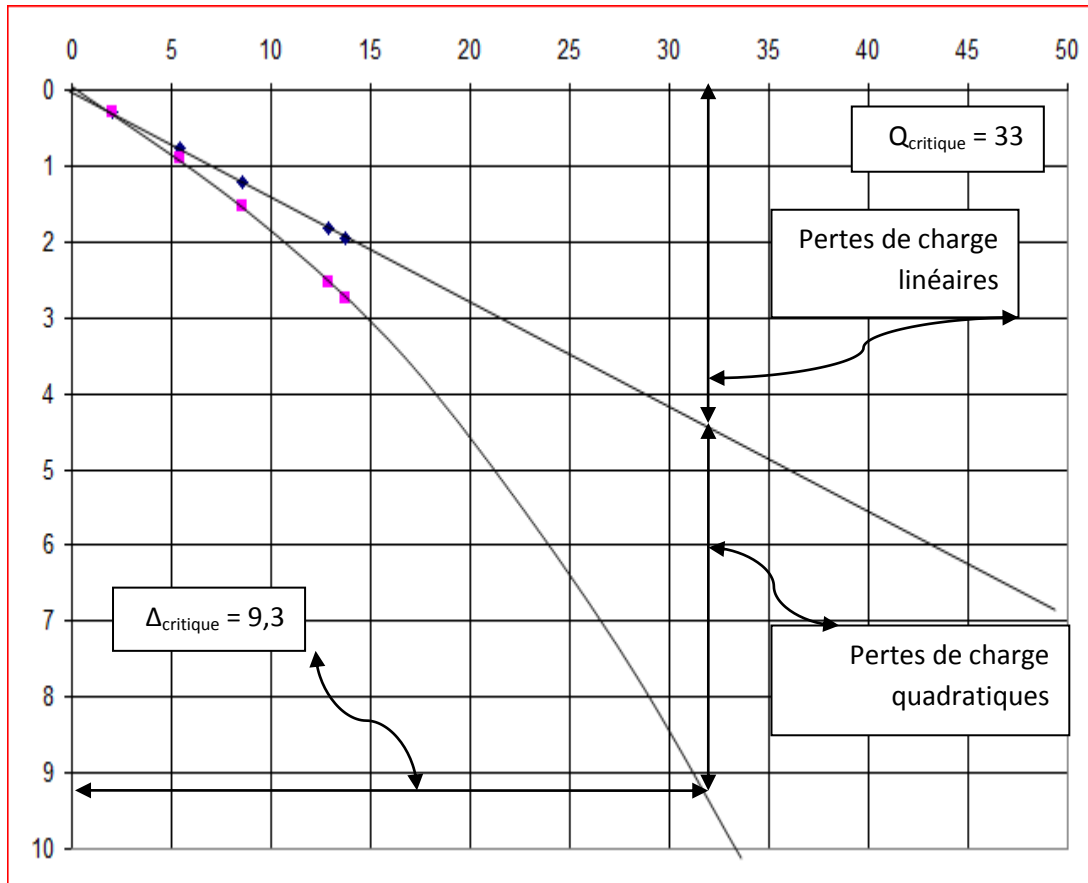


Figure II.10: Calcul Du Débit Critique Forage F1

Conclusion

L'étude des caractéristiques des forages et les résultats des essais de pompage sont indispensables pour permettre le choix, le dimensionnement et l'installation des pompes immergées qui leur sont spécialement destinées.

