

## Chapitre II : Pompages d'essai en régime permanent

### Introduction

L'écoulement permanent est un régime d'équilibre obtenu après une longue période de pompage lorsque la réalimentation de la nappe équivaut au débit d'extraction de l'eau. A un débit de pompage constant correspond une stabilisation du rabattement et du cône de dépression.

Les pompages en écoulement permanent sont les plus simples à interpréter, offrent des résultats précis mais demandent une longue période de pompage souvent incompatible avec les exigences économiques (fonctionnement et immobilisation du chantier). De plus, pour permettre une interprétation correcte, il faut un rabattement significatif avec un débit continu acceptable ce que ne permettent pas tous les aquifères.

### II.1. Méthodologie

Le pompage d'essai en régime permanent (parfois appelé essai par paliers de rabattement), consiste à effectuer des pompages dans le forage, pendant des temps relativement courts (normalement, toute la série peut être terminée en un jour), avec une série de paliers à débit différent, le débit augmentant habituellement à chaque palier. Le dernier palier devrait se rapprocher du rendement maximal estimé pour le forage, [Forkasiewicz, 1972, Kruseman, 1973].

Il peut être réalisé de différentes façons, mais la plus courante est la suivante :

- \* Commencer par un débit de pompage constant  $Q_1$  faible, jusqu'à obtenir un rabattement stabilisé au puits  $S_1$  ;
- \* On augmente alors le débit pour passer à un nouveau débit constant  $Q_2$  pour lequel on obtient un rabattement stabilisé  $S_2$  ;
- \* On poursuit avec des débits  $Q_3, Q_4$ , etc.
- \* Prévoir quatre à cinq paliers au total pour faire une interprétation de l'efficacité du puits, les débits de pompage progressant par échelons plus ou moins réguliers entre le minimum et le maximum.
- \* Tous les paliers doivent 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.
- \* Le débit pompé :

Avant le début de l'essai, la pompe est mise en marche une dizaine de minutes, vanne d'exhaure ouverte à fond afin de mesurer le débit maximal de production de l'ouvrage, soit  $Q_{max}$ . Le débit de chaque palier sera ensuite défini comme suit :

Tab. II.1: Débit et nombre de palier

Essai avec 4 paliers	Essai avec 3 paliers
Palier 01 : $Q_1 = Q_{max}/4$	Palier 01 : $Q_1 = Q_{max}/3$
Palier 02 : $Q_2 = Q_{max}/2$	Palier 02 : $Q_2 = 2Q_{max}/3$
Palier 03 : $Q_3 = 3Q_{max}/4$	Palier 03 : $Q_3 = Q_{max}$
Palier 04 : $Q_4 = Q_{max}$	

L'essai de pompage par paliers de courtes durées évalue les caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage de captage. Ce sont les :

- \* débits critiques, \* les débits spécifiques relatifs, \* les pertes de charge dans l'ouvrage et son environnement immédiat et, \* le débit maximum d'exploitation ou productivité.

Il permet également d'établir le programme d'équipement technique de l'ouvrage : tubage, crépine, et massif filtrant, puissance de la pompe, etc.

On admet généralement que le rabattement stabilisé au puits s'écrit (Rorabaugh, 1935) :

$$S = BQ + CQ^n \quad (\text{II.1})$$

Où, l'exposant  $n$  est compris entre 1.5 et 3.5. Jacob (1947) avait proposé  $n = 2$

Donc ; 
$$S = BQ + CQ^2 \quad (\text{II.2})$$

Le but principal des pompages d'essai par paliers est de déterminer la courbe caractéristique du puits,  $s = f(Q)$ , soit l'évolution du rabattement en fonction du débit de pompage (fig. II.1), et le débit critique  $Q_c$ .

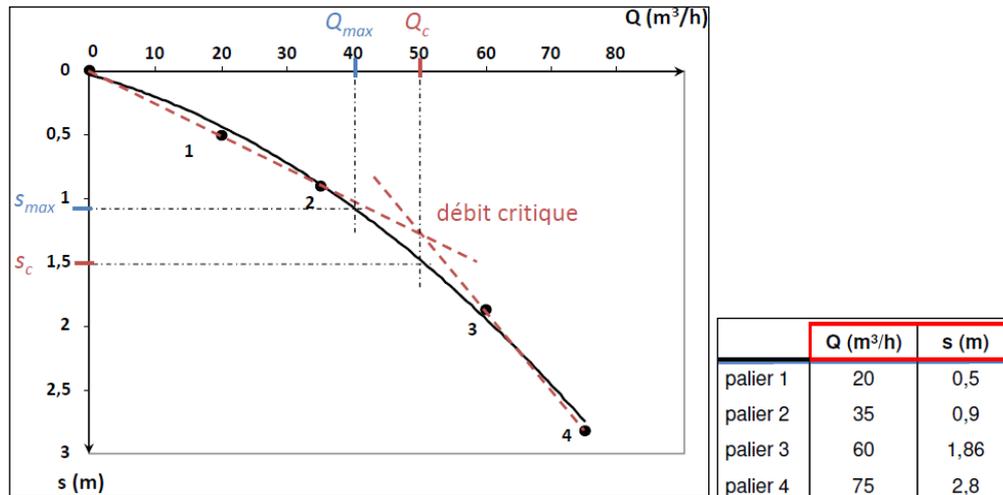


Fig. II.1 : Détermination du débit critique et débit d'exploitation, (Danièle V-L et Valérie P., 2015)

La figure II.2, illustre une séquence typique de débits de pompage ( $Q$ ) et le comportement du niveau d'eau. On voit immédiatement pourquoi cet essai est dit « par paliers ».

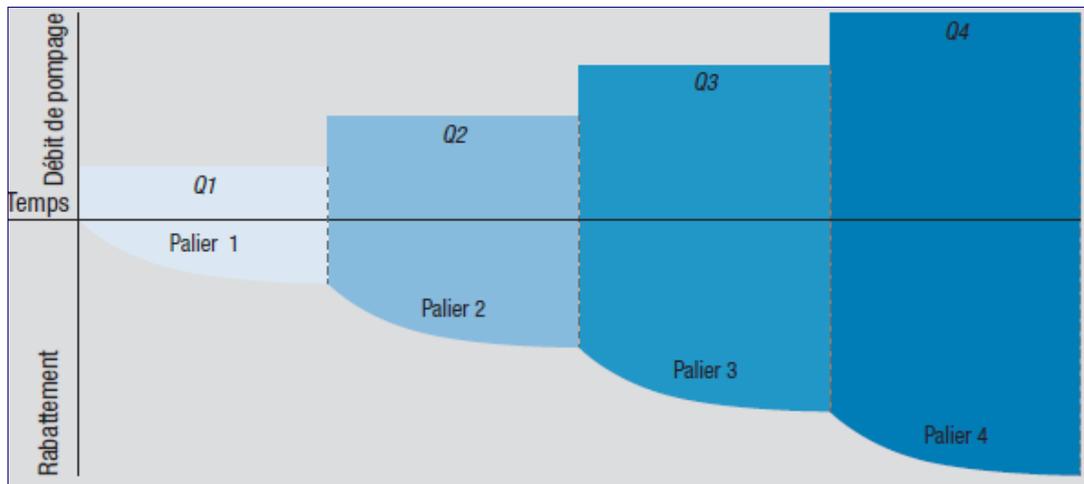


Fig. II.2 : Schéma de l'essai par palier, (OIE, 2013)

- Déroulement de l'essai par paliers

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

1. Choisissez un point de référence (par ex. le bord supérieur du tubage) à partir duquel tous les relevés du niveau d'eau seront effectués, et mesurez le niveau d'eau résiduel. Le niveau doit être stable avant le début de l'essai.

2. Ouvrez la vanne au réglage prévu pour le premier palier (fixé lors de l'essai précédemment décrit) et enclenchez simultanément la pompe et le chronomètre.
3. Mesurez 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 vous oubliez de mesurer le niveau d'eau au moment prévu, notez précisément l'heure à laquelle le relevé est effectué. Consignez tous les relevés sur le formulaire standard prévu pour les essais par paliers.
4. Mesurez 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, mesurez le débit à ces moments-là également. Si le débit de pompage change de manière significative (disons plus de 10 %), ajustez la vanne pour maintenir un débit aussi stable que possible durant tout le palier.
5. À la fin du 1<sup>er</sup> palier, ouvrez la vanne jusqu'au réglage prévu pour le 2<sup>e</sup> palier, notez l'heure (ou redémarrez le chronomètre) et répétez les mesures du niveau d'eau et du débit de pompage.
6. Répétez la procédure pour les paliers suivants, en augmentant progressivement le débit de pompage à chaque palier.
7. À la fin du dernier palier (qui sera probablement le 4<sup>ème</sup> ou le 5<sup>ème</sup>) débranchez la pompe, notez l'heure (ou redémarrez le chronomètre) et mesurez la remontée du niveau d'eau aux mêmes intervalles que ceux auxquels vous avez mesuré le rabattement lors de chaque palier. Continuez pendant la durée d'au moins un palier, idéalement beaucoup plus longtemps, jusqu'à ce que le niveau d'eau se rapproche du niveau enregistré avant l'essai. Pour une explication détaillée de la période de remontée, [ Marsily , 2004].

## II.2. Analyse et interprétation

### II.2.1. 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, [Cooper et Jacob, 1946].

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 :

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

Où,  $s$  est le rabattement,  $Q$  le débit de pompage et  $B$  et  $C$  des constantes.

### II.3. Calcul des pertes de charge

Le rabattement  $s$ , mesuré dans l'ouvrage à un instant  $t$ , est la somme de deux composantes, nommées pertes de charge, exprimées en m et caractérisant le complexe aquifère/ouvrage et, donné par la relation (II.2) :

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

#### II.3.1. Pertes de charge linéaires BQ

Elles résultent de deux effets :

- Influence de l'aquifère : imposées par les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, au voisinage de l'ouvrage, croissent avec le pompage.
- Influence de la partie captante de l'aquifère : remaniement du réservoir, crépine et massif filtrant. L'effet peut être positif ou négatif (colmatage). Ces pertes de charge sont constantes et dépendent de la technique d'équipement de l'ouvrage.

### II.3.2. Pertes de charge quadratiques $CQ^2$

Elles sont fonction uniquement du débit pompé, constantes à débit constant. Elles sont caractéristiques de l'équipement technique de l'ouvrage, du diamètre du tubage et de la crépine.

#### - Détermination graphique des coefficients $B$ et $C$

L'équation (II.2) divisée par  $Q$  donne l'équation du rabattement spécifique :

$$s/Q = B + C \quad (\text{II.3})$$

Cette expression établie pour l'aquifère à nappe captive, est étendue à l'aquifère à nappe libre sous condition que le rabattement mesuré soit inférieur à  $0,1 b$  ( $b$ , représentant l'épaisseur de l'aquifère).

L'équation (II.3) est une 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  $(Q/s)$  ; le débit spécifique. Le coefficient  $B$  est donné par l'intersection de la droite avec l'axe de  $s/Q$  et le coefficient  $C$  est la pente de la droite (fig. II.3). Les valeurs de  $B$  et  $C$  peuvent ensuite être utilisées dans l'équation (II.2) pour calculer le rabattement escompté pour les autres débits ou, en adaptant légèrement l'équation, le débit attendu pour un rabattement donné.

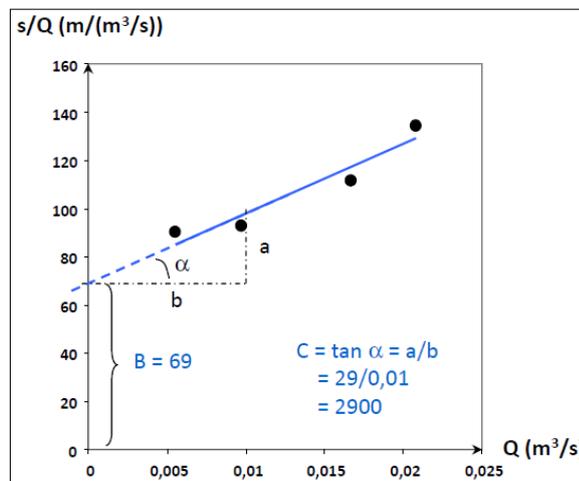


Fig. II.3 : Courbe  $s/Q$  – Débit, (Danièle V-L et Valérie P., 2015)

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. À 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 ci-dessous. Tracez la droite la mieux ajustée passant par les points: le point où la droite coupe l'axe y représente la constante  $B$  et la pente de la droite représente la constante  $C$ .

La courbe  $s/Q$  en fonction de  $Q$  doit être une droite de pente  $C$  et d'ordonnée à l'origine  $B$ . WALTON a proposé une méthode qui permet de caractériser l'état du puits par la valeur de  $C$ , [Detay, 1993] :

- $C < 675 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$  : Bon puits, développement correct,
- $675 < C < 1350 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$  : puits médiocre,
- $C > 1350 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$  : puits colmaté ou détérioré,
- $C > 5400 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$  : puits irrécupérable.

Avec  $Q$  en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

- $C < 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$  : Bon puits, bien développé,
- $5,2 \cdot 10^{-5} < C < 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$  : Médiocre,
- $C > 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$  : Puits colmaté ou détérioré,
- $C > 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$  : Puits irrécupérable.

Avec  $Q$  en  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Si l'essai par paliers est répété à une date ultérieure et que la droite la mieux ajustée (sur la figure II.4) 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.

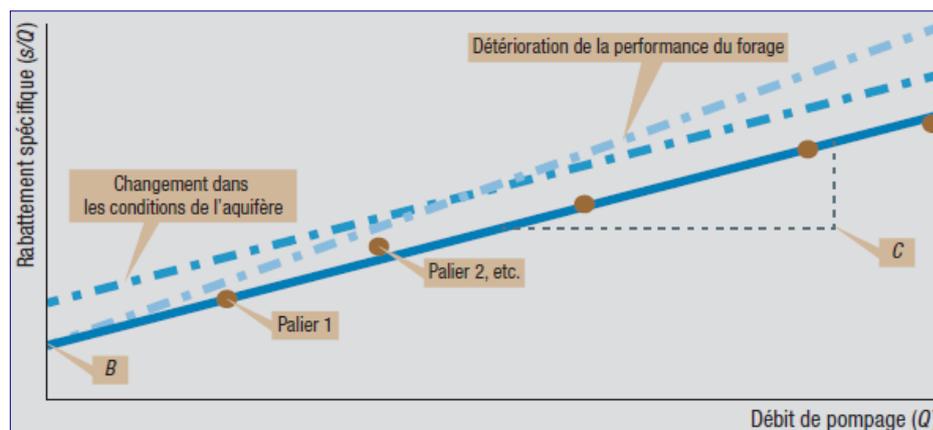


Fig. II.4 : Analyse de l'essai par paliers, (OIE, 2013)

#### II.4. Détermination du débit d'exploitation maximum

La productivité d'un puits,  $Pr$ , 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. Le rabattement maximum admissible est imposé par :

\* Des contraintes physiques et techniques du complexe aquifère/ouvrage de captage, exprimées par le débit critique,  $Q_c$  et le rabattement critique,  $s_c$ , correspondant, mesurés par les essais de puits.

(En pratique, si  $Q_c=150\text{m}^3/\text{h}$  et  $s_c=5\text{m}$ . le débit maximum,  $Q_{\max}$  et le rabattement maximum, doivent être inférieurs de 5 à 10%, soit  $Q_{\max}=135 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $s_{\max}=4.50\text{m}$ .

\* Des contraintes socio-économiques, dont la principale est le coût de production de l'eau, imposant la profondeur du niveau dynamique. Le rabattement maximum retenu doit donc être égal au rabattement maximum mesuré sans dépasser le rabattement maximum admissible.

$$(Pr = Q_s \cdot s_{\max} = Q_{\max}), \text{ [Detay, 1993]}$$

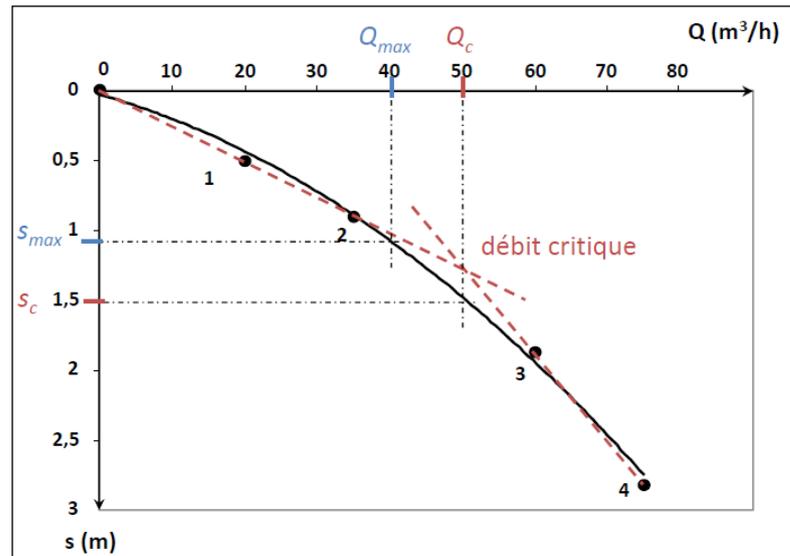


Fig. II.5 : Courbe caractéristique du puits (détermination du débit critique)

### Conclusion

L'essai par palier ou de courte durée est une méthode utile pour la détermination des pertes de charge générées par l'écoulement de l'eau à travers l'équipement de forage. Il permet également de déterminer le débit d'exploitation et le rabattement induit par le pompage.