

Université Abou Bekr BELKAID
Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique
Options:
Hydraulique urbaine & Ouvrages hydrauliques

Cours d'Hydraulique souterraine

(Deuxième partie)

7U 822 & 7O 822

Pr K. BABA-HAMED



**EAUX
SOUTERRAINES**

Cours d'Hydraulique souterraine M1 HU & M1 OH

Cours sur les Essais de pompage



Pr K.BABA HAMED
2019 - 2020

ESSAIS DE POMPAGE

Les essais de pompage constituent une étape très importante dans un projet d'alimentation en eau puisqu'ils ont pour objet de permettre de juger si l'ouvrage réalisé répond aux objectifs fixés.

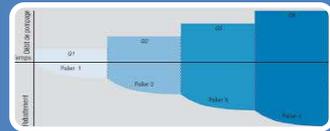
Ils permettent de déterminer quelle quantité d'eau peut être pompée, à quel rythme, quelle pompe choisir et à quelle profondeur l'installer.

L'observation des effets d'un pompage sur le milieu souterrain est une des meilleures méthodes d'étude in situ en hydrogéologie, il permet une plus grande connaissance de l'aquifère.

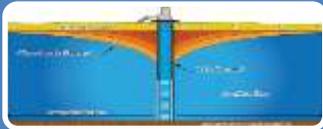


ESSAIS DE POMPAGE

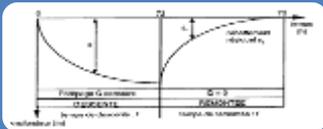
On distingue deux types d'essais qui correspondent chacun à des objectifs différents :



Essai de pompage par paliers de débit



Essai de nappe



Essai de remontée



Essai de pompage Par paliers de débit (Essai de puits)

permet d'évaluer:

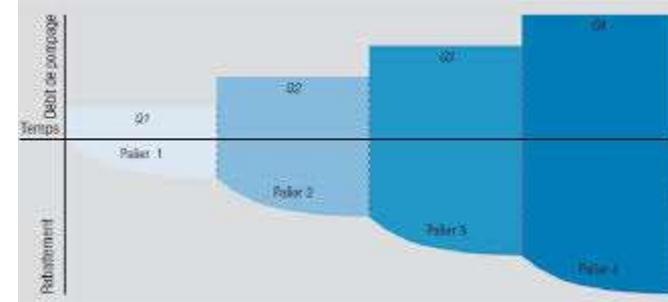
- ❑ les caractéristiques de l'ouvrage,
- ❑ son environnement immédiat.

Cet essai donne accès:

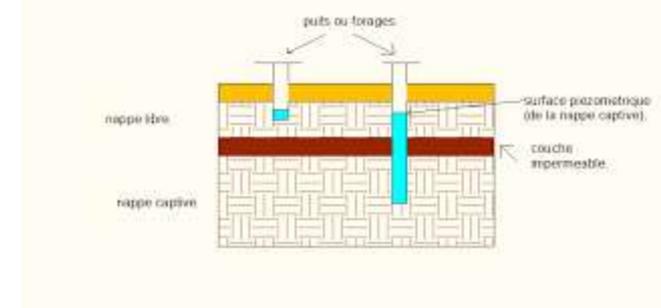
- ❖ au débit critique de l'ouvrage,
- ❖ aux différentes pertes de charge
- ❖ aux rabattements en fonction des débits.

Cet essai s'avère particulièrement intéressant pour:

- déterminer si l'ouvrage réalisé est capable de répondre aux besoins des usagers,
- définir les limites d'exploitation,
- obtenir des données permettant d'envisager une éventuelle réhabilitation, ou encore une nouvelle modalité d'exploitation (par exemple remplacement d'une pompe à main par une pompe électrique immergée).



Essai longue durée (Essai de nappe)



Cet essai permet de:

- ❖ estimer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère,
- ❖ préciser ses conditions aux limites.

Les informations généralement recherchées par ce type d'essai sont:

- la transmissivité, (qui permet ensuite de calculer le coefficient de perméabilité),
- le coefficient d'emmagasinement, si la nappe est captive, ou la porosité de drainage si la nappe est libre,
- le rayon d'influence du pompage,
- les conditions aux limites.

Cet essai nécessite un pompage à débit constant et un suivi piézométrique sur plusieurs jours.

Essai de remontée



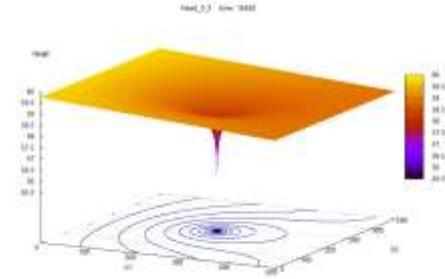
Ce n'est pas un essai de pompage au sens strict du terme, car il consiste à observer la remontée de l'eau après l'arrêt du pompage. Néanmoins, l'essai de remontée est digne d'intérêt pour plusieurs raisons :

- ❑ il permet de vérifier les caractéristiques de l'aquifère déduites des essais de pompage, avec un minimum d'effort, il suffit de prolonger l'observation après que la pompe a été débranchée.
- ❑ c'est une option intéressante pour tester les forages opérationnels dans lesquels un pompage à débit constant a déjà été réalisé pendant de longues périodes. Dans ce cas, l'essai de remontée peut se faire lorsque les pompes sont arrêtées, puis on effectue un essai à débit constant lorsque les pompes sont rebranchées.

Ces essais peuvent être réalisés individuellement ou combinés. Une suite complète d'essais commence par un essai par paliers, dont les résultats aident à déterminer le débit de pompage de l'essai à débit constant, et se termine par l'essai de remontée.

Réalisation des essais

Vérification du site



❖ L'accès au site et l'installation de l'équipement de pompage (pompes et générateurs) doivent être possibles.

❖ Il est important de vérifier qu'aucun ouvrage n'est en exploitation à proximité de la zone de l'essai. Dans le cas contraire, l'exploitation doit être stoppée 24 heures avant le début des essais. Durant les essais, tous les puits ou forages à proximité (rayon de 300 m maximum) peuvent être utilisés comme piézomètres.

❖ L'eau pompée doit être évacuée aussi loin que possible de la zone d'essai. En effet, il est possible que l'eau refoulée s'infilte suffisamment rapidement pour recharger l'aquifère et donner une image d'une limite naturelle par une stabilisation du rabattement. Le point d'évacuation sera choisi en fonction des conditions du site (essentiellement perméabilité et épaisseur du terrain), mais une distance minimale de 50 à 100 m devra être respectée.

Réalisation des essais

Équipement nécessaire

L'équipement de base comprend:

- un mètre à ruban de 3 mètres (mesure de la hauteur des références par rapport au niveau du sol, diamètre du puits, etc.),
- une sonde piézométrique,
- deux chronomètres pour les mesures de temps,
- un récipient étalonné pour les mesures de débit. Le temps de remplissage du récipient doit être compris entre 30 et 60 secondes pour garantir une précision suffisante.

L'utilisation d'un débitmètre facilite grandement la réalisation des essais, mais il doit être étalonné au préalable.



Réalisation des essais



Personnel nécessaire

- Une équipe de quatre personnes est suffisante pour mener à bien les essais courants.
- Un chef d'équipe responsable de l'enregistrement des données, de la construction des graphiques diagnostiques et des décisions relatives à la conduite de l'essai (choix des débits et des durées...).
- Deux opérateurs sont en charge de la mise en place de l'équipement et de la prise de mesures (débits, niveaux d'eau, durées, qualité de l'eau).
- Dans la mesure du possible, un hydrogéologue définit le type d'essais et interprète les données.

Réalisation des essais

Suivi des essais

Au cours des essais, il faut enregistrer:

- les durées,
- les niveaux d'eau,
- les débits.

Les mesures sont prises selon un pas de temps court en début de pompage et de période de remontée, puis le pas s'élargit avec le ralentissement de l'évolution des rabattements.

À chaque mesure de temps correspond une mesure de niveau d'eau.

Avant le démarrage des essais, le niveau statique dans l'ouvrage est noté par rapport à une marque de référence habituellement choisie comme le haut du tubage, on note aussi sa hauteur par rapport au niveau du sol.



Réalisation des essais

Rapport



Le rapport des essais de pompage doit contenir les informations suivantes :

- une carte de localisation des ouvrages,
- un résumé des principaux résultats d'interprétations et les recommandations,
- les rapports des forages testés : coupe géologique, équipement, remarques,
- les graphiques des données de terrain ($s=f(t)$ et $s=f(Q)$), les graphiques diagnostiques et les graphiques spécifiques des interprétations,
- les tableaux des mesures de terrain.

Essai de pompage par palier Exemple d'interprétation d'essai par palier Forage F1							
Date de réalisation: 12/11/2004		Profondeur de la pompe: 00		Niveau (m): 1		5000 m³/jour	
Méthode de l'essai: Deuxièmement		Aquifère: nappes libres de la crête					
Débit palier m³/s	Rabatement s m	débit spécifique m³/s/m	débit spécifique m³/s/m	débit théorique $s = 0,02$	débit calculé $s = 0,02$	Rabatement de l'ouvrage	
palier 1	42	0,81	51,85	0,019	0,88	0,82	82,92%
palier 2	87	2,01	43,29	0,023	1,81	2,01	70,10%
palier 3	132	3,83	37,39	0,027	2,14	3,52	66,71%
palier 4	178	6,47	27,51	0,036	2,88	5,40	55,40%

Droite Débit / Rabatement spécifique	
0,04	
0,035	
0,03	
0,025	
0,02	
0,015	
0,01	
0,005	
0	

Essai par paliers (Essai de puits)

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 :

- ❑ 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, 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.
- ❑ Ouvrez la vanne au réglage prévu pour le premier palier et enclenchez simultanément la pompe et le chronomètre.

Essai par paliers (Essai de puits)

Dérroulement de l'essai par paliers



- ❑ 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, 3 ou 4, ayant été fixée lors des préparatifs de l'essai avec au moins 1 heure pour la descente et 1 heure pour la remontée). 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.
- ❑ Mesurez le débit de pompage juste après le début du palier, puis à intervalles réguliers (toutes les 15 minutes). 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 (plus de 10 %), ajustez la vanne pour maintenir un débit aussi stable que possible durant tout le palier. Veillez à ne pas trop corriger, ce qui aggraverait encore le problème.

Essai par paliers (Essai de puits)

Dérroulement de l'essai par paliers



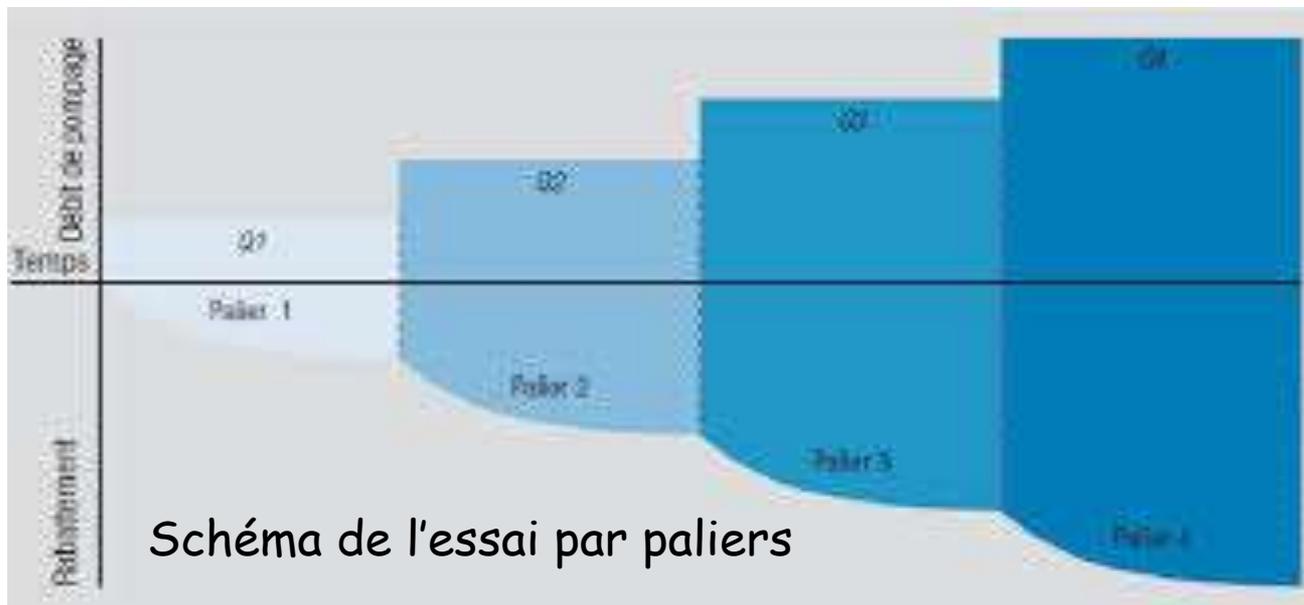
- ❑ À la fin du 1er palier, ouvrez la vanne jusqu'au réglage prévu pour le 2e palier, notez l'heure (ou redémarrez le chronomètre) et répétez les mesures du niveau d'eau et du débit de pompage (voir points 3 et 4 ci-dessus).
- ❑ Répétez la procédure pour les paliers suivants, en augmentant progressivement le débit de pompage à chaque palier.

Essai par paliers (Essai de puits)



Dérroulement de l'essai par paliers

- À la fin du dernier palier (qui sera probablement le 4^{ème} ou le 5^{ème}) 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.

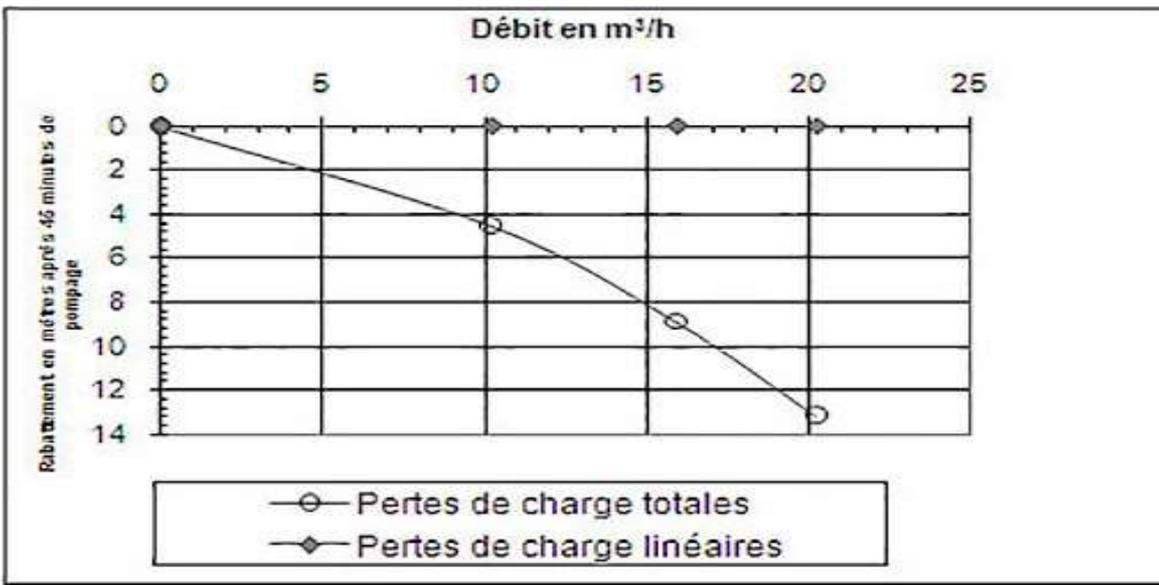


Essai par paliers (Essai de puits)

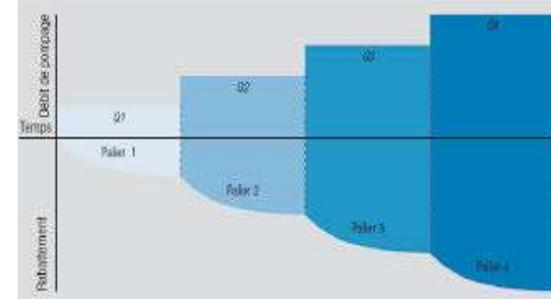
Analyse et interprétation

L'essai de puits consiste à réaliser un pompage par paliers qui permet d'établir la **courbe caractéristique** de l'ouvrage: c'est la courbe des rabattements dans l'ouvrage en fonction des débits pompés. Elle constitue la fiche d'identité de l'ouvrage.

Objectif : déterminer le débit critique

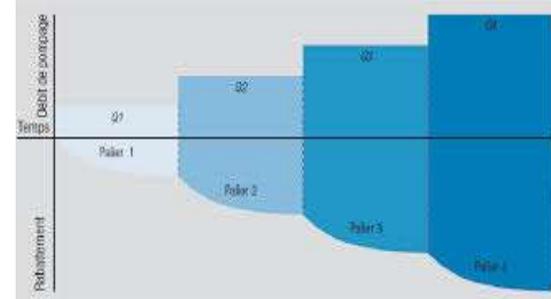


Courbe caractéristique



Essai par paliers (Essai de puits)

Analyse et interprétation



L'essai par paliers peut être réalisé comme suit:

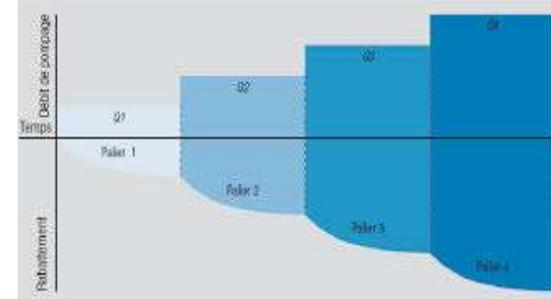
- ❑ Commencer par un débit de pompage faible et l'augmenter à chaque palier, sans débrancher la pompe entre les paliers,
- ❑ Prévoir 4 à 5 paliers au total, les débits de pompage progressent par échelons plus ou moins réguliers entre le minimum et le maximum,
- ❑ tous les paliers devraient avoir la même durée (1h à 3h), 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 fonctionne à pleine capacité.

Essai par paliers (Essai de puits)

Analyse et interprétation

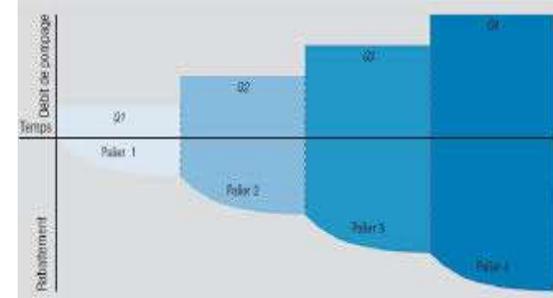
Remarques

- ❑ Pour les aquifères à nappe captive, trois paliers de débit peuvent être suffisants,
- ❑ Pour les aquifères à nappe libre, le nombre de paliers est supérieur (peut aller jusqu' à 6),
- ❑ Le débit initial est égal à celui de la puissance minimale de la pompe, ensuite les débits croissent selon une progression de 2, 3, 4.



Essai par paliers (Essai de puits)

Analyse et interprétation



La théorie de l'Hydraulique souterraine présuppose que pendant le pompage dans un forage, l'écoulement est laminaire et donc le rabattement dans le forage est proportionnel au débit de pompage.

Si on augmente le débit, l'écoulement devient turbulent. Ceci entraîne des pertes de charges dans le puits.

Jacob propose d'exprimer le rabattement dans le forage par l'équation:

$$s = BQ + CQ^2$$

s : rabattement (m), Q : débit de pompage (m^3/h), B et C des constantes

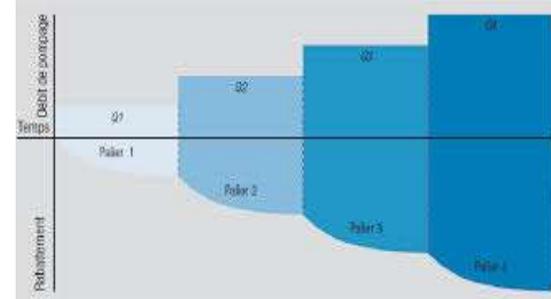
s/Q : rabattement spécifique, Q/s : capacité spécifique.

BQ : perte de charge linéaire

CQ^2 : perte de charge quadratique.

Essai par paliers (Essai de puits)

Analyse et interprétation



$$s = BQ + CQ^2$$

- ❑ **Perte de charge linéaire (BQ)**, résulte de l'influence de l'aquifère où l'écoulement est laminaire, cette perte de charge croît avec le temps.
- ❑ **Perte de charge quadratique (CQ²)**, résulte de l'influence de l'équipement technique de l'ouvrage, diamètre du tubage et de la crépine.

$$s/Q = B + CQ$$

s/Q : Rabattement spécifique

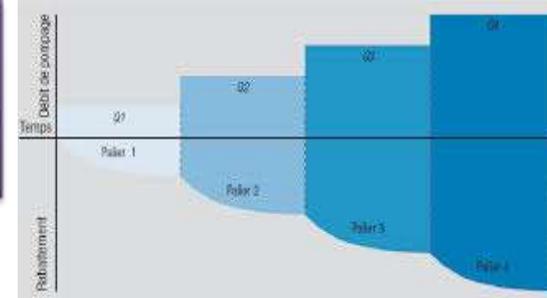
Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Données

Les résultats d'un essai de pompage par paliers réalisé sur un puits à nappe libre sont donnés dans le tableau suivant :

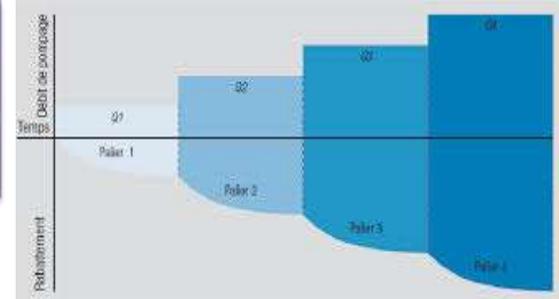
Essais globaux	Débits (m ³ /h)	Rabattements (m)	Débits spécifiques (m ³ /h/m)	Rabattements spécifiques (m/m ³ /h)
1 ^{ier} palier	42	0.80	52.5	0.0190
2 ^{ième} palier	87	2	43.5	0.0230
3 ^{ième} palier	132	3.5	37.7	0.0265
4 ^{ième} palier	178	6.5	27.4	0.0365

- 1- Tracez les graphiques débit/temps de pompage, rabattement / temps de pompage en considérant que les temps de pompage par palier sont identiques.
- 2- Tracez la courbe caractéristique, commentez l'allure de la courbe.
- 3- Déterminez le débit critique, en déduire le débit maximum d'exploitation et le rabattement correspondant.
- 4- Calculez le débit spécifique relatif.
- 5- Tracez la droite débits/rabattements spécifiques, commentez l'allure de la droite.
- 6- Calculez les pertes de charge et en déduire l'expression de Jacob.
- 7- Quels sont les rabattements correspondants aux débits : 20, 50, 100 m³/h ?

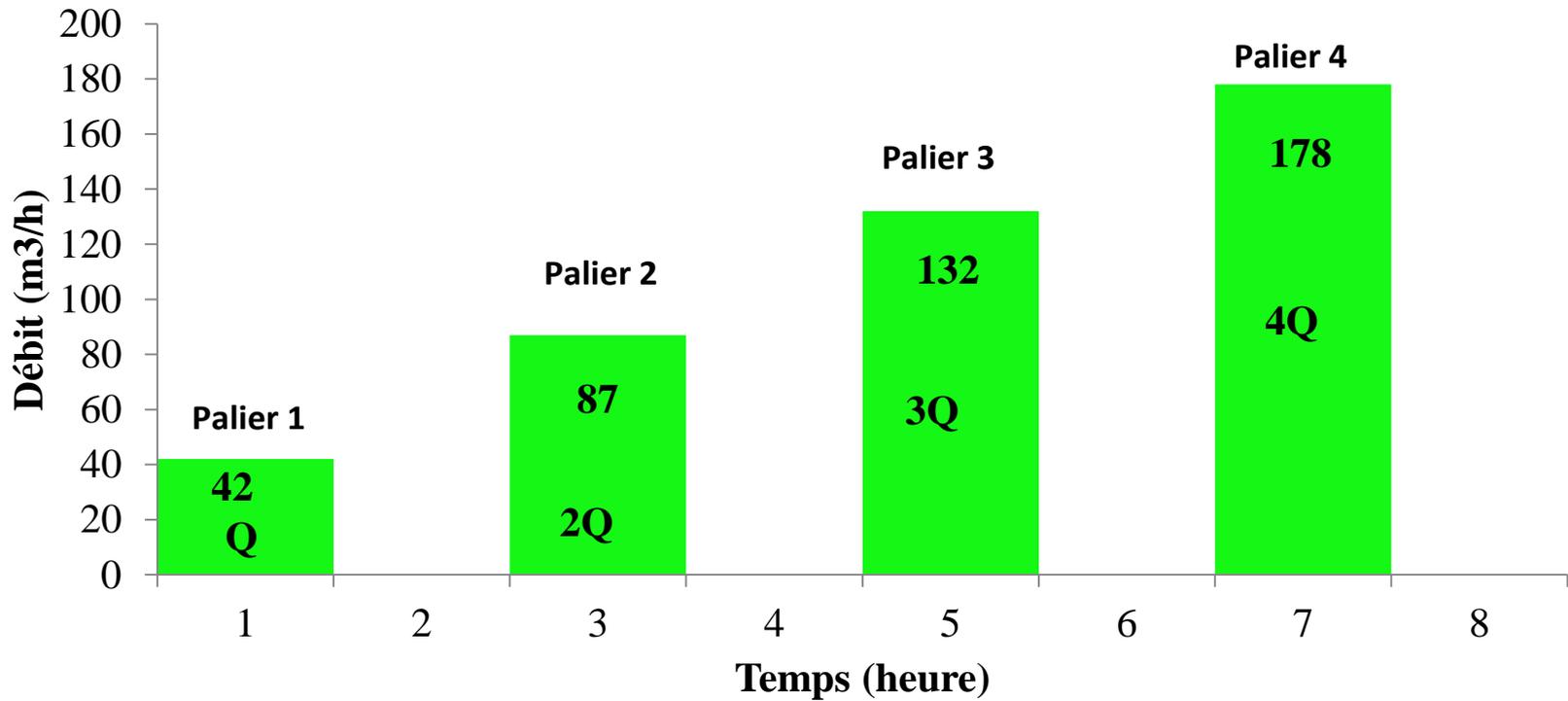


Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Interprétation graphique des données de l'essai de puits



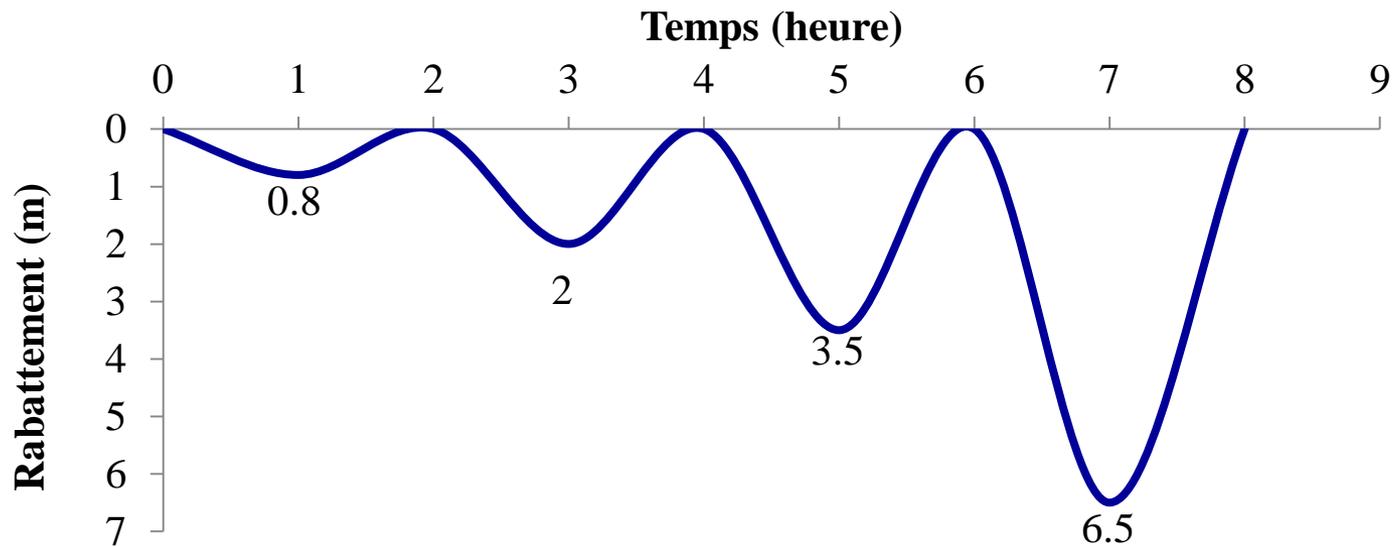
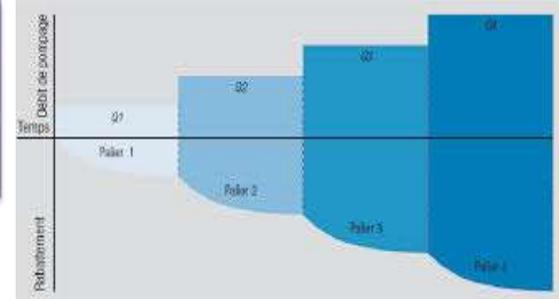
Graphique débit/temps de pompage



Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Interprétation graphique des données de l'essai de puits

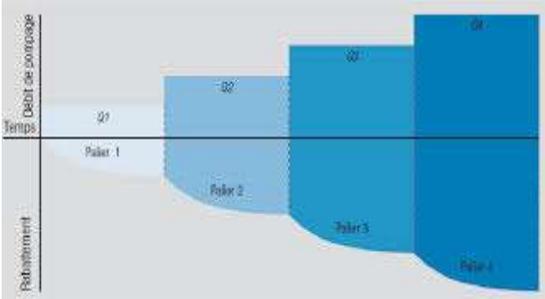
Graphique rabattement / temps de pompage



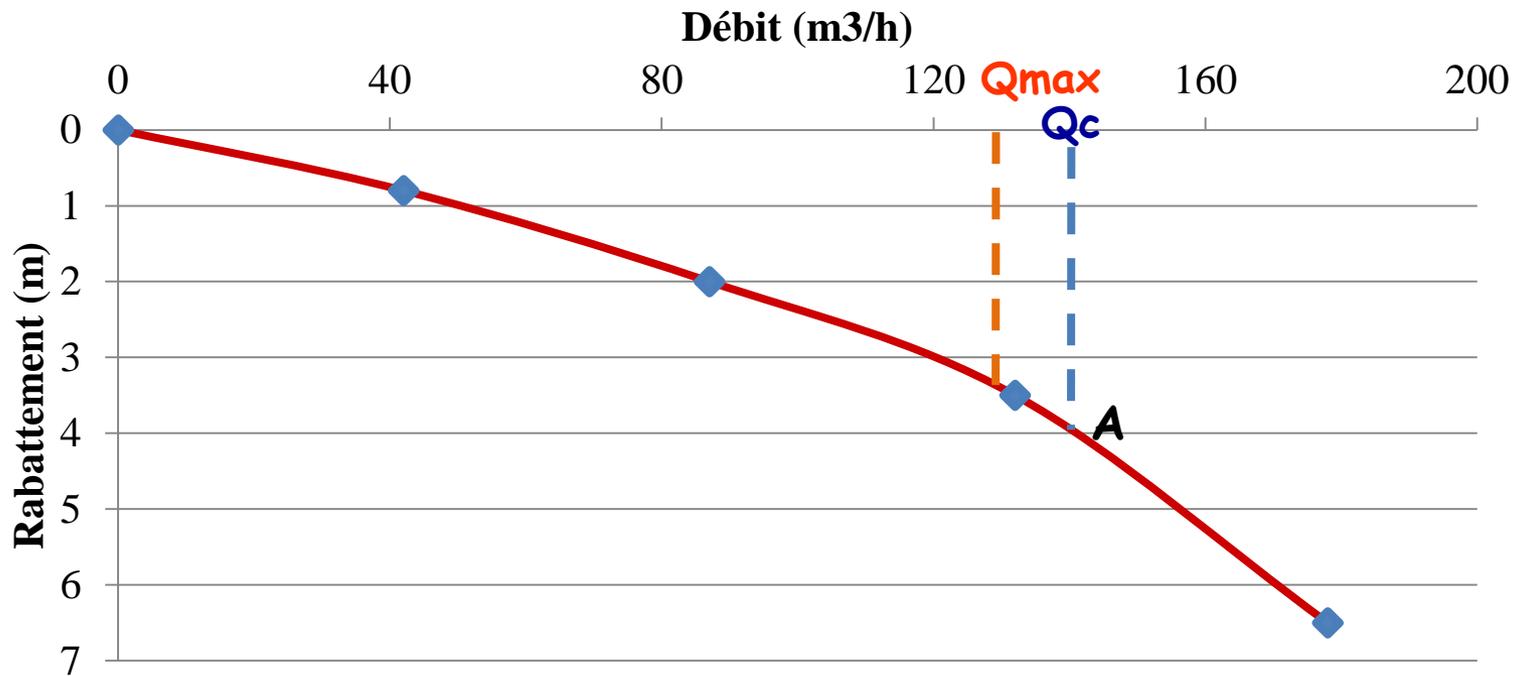
Ce graphique permet de contrôler le bon déroulement de l'essai de puits

Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Interprétation graphique des données de l'essai de puits

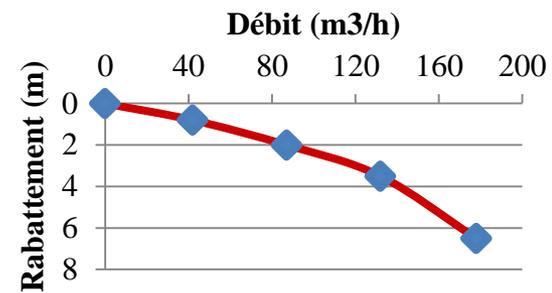


Courbe caractéristique du puits



Essai par paliers (Essai de puits)

Exercice



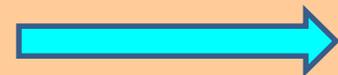
Interprétation graphique des données de l'essai de puits

Courbe caractéristique du puits

Le couple débit - rabattement est reporté sur un papier graphique linéaire, les points obtenus tracent la courbe caractéristique représentant la fonction $s = f(Q)$.

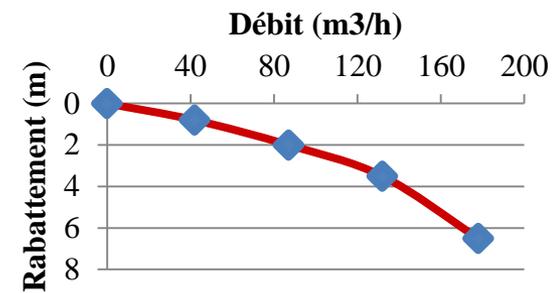
Remarque: la forme de la courbe apporte des informations sur le comportement hydrodynamique du complexe aquifère / ouvrage de captage.

- Droite: perte de charge quadratique nulle ou négligeable,
- Courbe convexe: perte de charge quadratique importante,
- Courbe concave: traduit un essai de puits non valable (mesures incorrectes).



Essai par paliers (Essai de puits)

Exercice



Interprétation graphique des données de l'essai de puits

Courbe caractéristique du puits

La courbe caractéristique est un document fondamental qui doit figurer obligatoirement dans le dossier de l'ouvrage. Elle détermine le débit maximum d'exploitation fonction d'un rabattement maximum admissible.

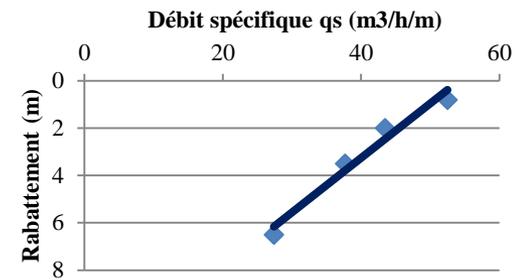
La courbe caractéristique présente deux parties distinguées par le point critique A (point d'inflexion) correspondant en abscisse au **débit critique Q_c** (dans notre cas : $Q_c = 140\text{m}^3/\text{h}$) (augmentation de la pente de la courbe).

Le **débit d'exploitation maximum (productivité du puits) Q_{max}** = $130\text{m}^3/\text{h}$, correspondant à un rabattement maximum s_{max} (dans notre cas: $s_{\text{max}} = 3.5\text{m}$).

Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Interprétation graphique des données de
l'essai de puits

Droite débit spécifique/rabatement



Le débit spécifique d'un puits noté **qs** est le rapport entre le débit pompé Q et le rabattement s dans le puits.

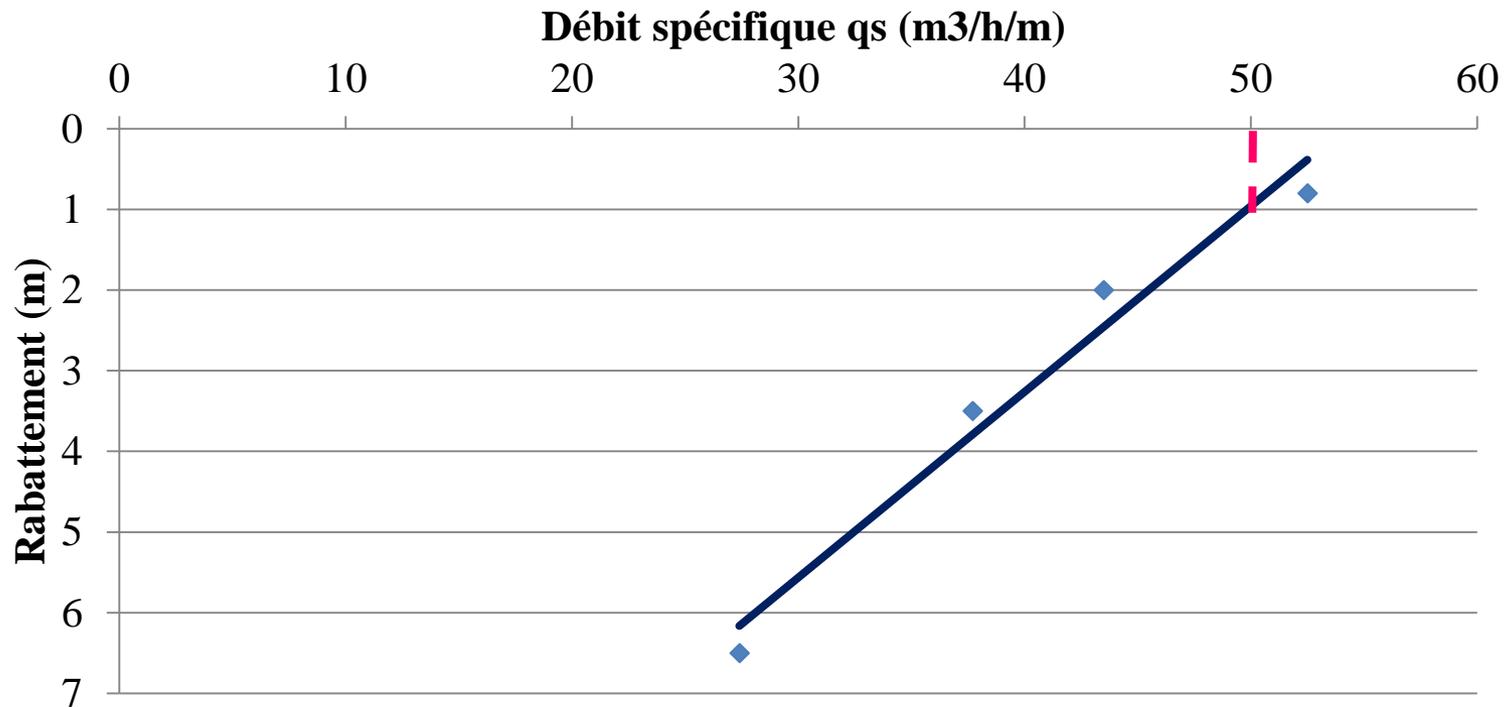
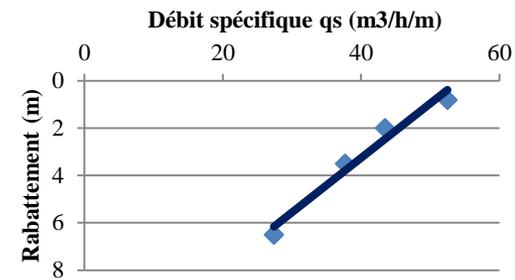
$$\text{Ex: } q_{s1} = Q_1 / S_1 = 42 / 0.80 = 52.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}.$$

La relation débit spécifique-rabattement est représentée par une droite inclinée.

Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Interprétation graphique des données de
l'essai de puits

Droite débit spécifique/rabattement



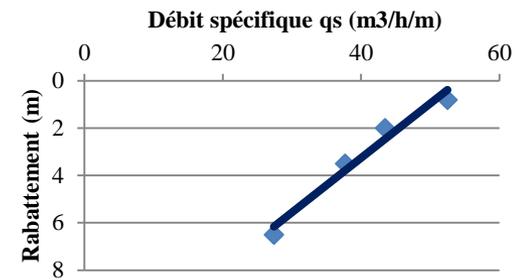
Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Interprétation graphique des données de
l'essai de puits

Droite débit spécifique/rabatement

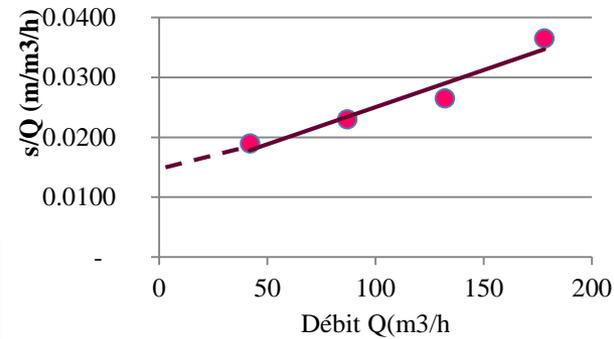
La droite débit spécifique - rabatement permet de calculer le **débit spécifique relatif** correspondant à un rabatement unitaire ($s = 01$ mètre).

Ex: dans notre cas, le débit spécifique relatif = $50 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$



Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Interprétation graphique des données de
l'essai de puits



Droite débit/rabattement spécifique

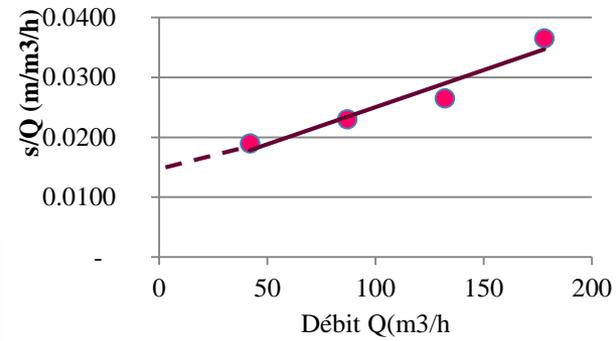
Le rabattement spécifique (s/Q) est le rapport entre le rabattement et le débit pompé.

$$\text{Ex: } s_1/Q_1 = 0.80/42 = 0.0190 \text{ m/m}^3/\text{h}$$

L'équation de Jacob, $s = BQ + CQ^2$
peut s'écrire:

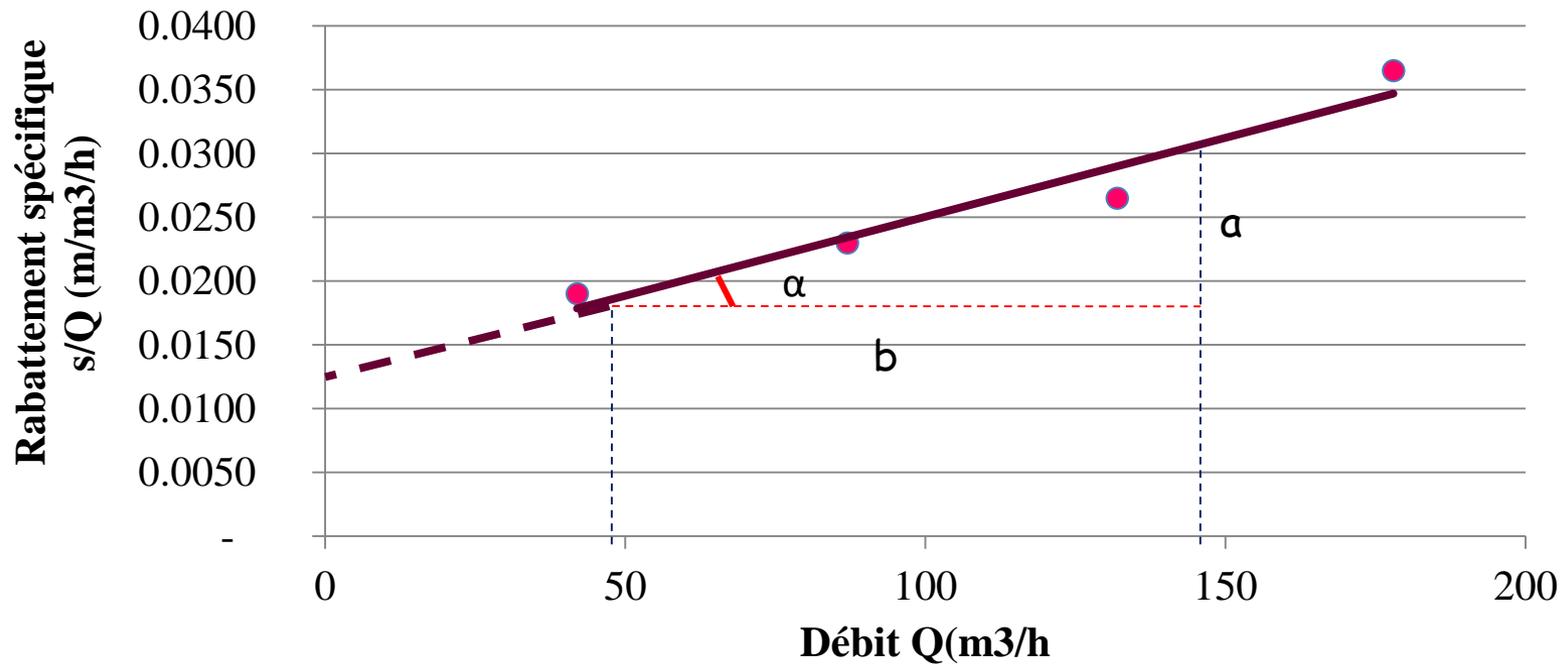
$$s/Q = B + CQ$$

Essai par paliers (Essai de puits) Exercice



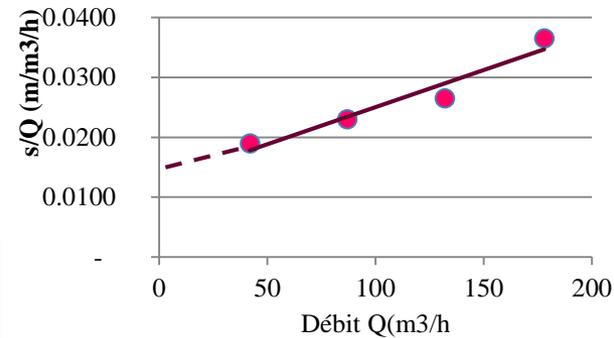
Interprétation graphique des données de l'essai de puits

Droite débit/rabatement spécifique



Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Interprétation graphique des données de l'essai de puits



Droite débit/rabattement spécifique

Dans la relation débit - rabattement spécifique quatre cas de courbes peuvent se présenter:

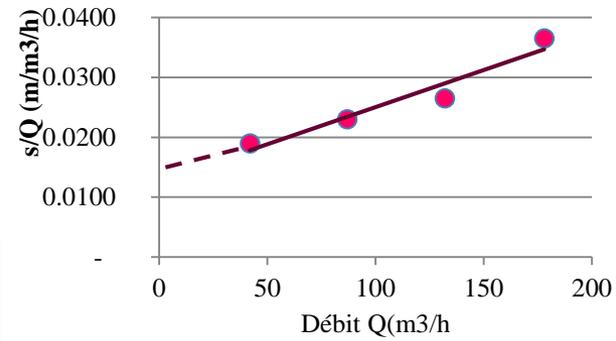
□ Droite passant par l'origine \longrightarrow prédominance du régime turbulent dans l'aquifère et dans le puits: $s = CQ^2$.

□ Droite ne passant pas par l'origine \longrightarrow régime turbulent et laminaire (cas de notre exemple): $s = BQ + CQ^2$

□ Droite à pente nulle verticale parallèle à l'axe des ordonnées \longrightarrow régime laminaire avec pertes de charge dans la crépine et tubages nulles ou négligeables: $s = BQ$

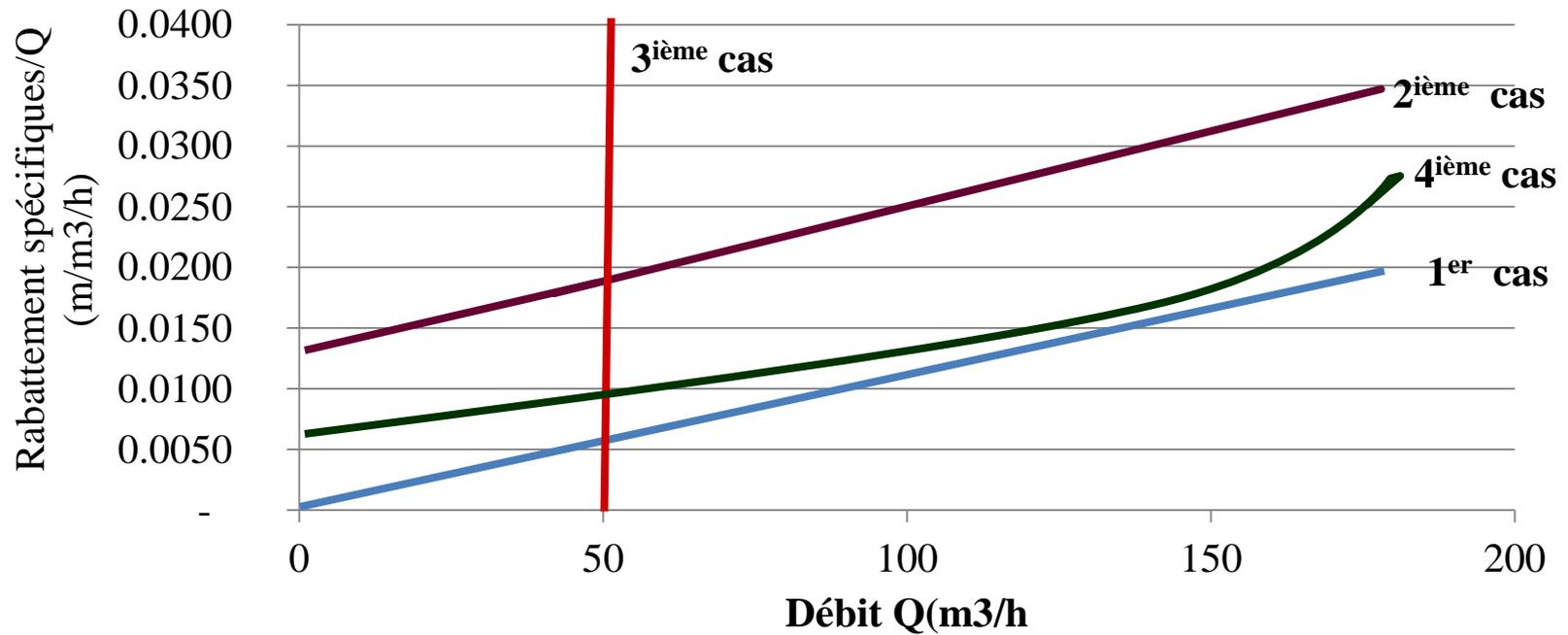
□ Courbe concave vers le haut: $s = BQ + CQ^n$ avec $n = 2, 3, 4, \dots$ etc

Essai par paliers (Essai de puits) Exercice



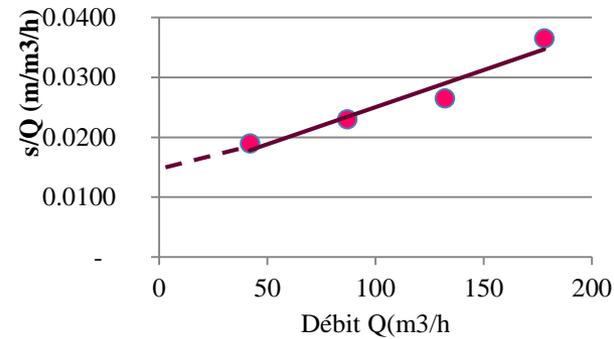
Interprétation graphique des données de l'essai de puits

Droite débit/rabatement spécifique



Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Calcul des pertes de charge



La droite débit /rabattement spécifique permet de déterminer les coefficients B et C de l'équation:

$$s/Q = B + CQ$$

➤ Calcul du coefficient B

est obtenu par l'intersection de la droite représentative avec l'axe des rabattements spécifiques.

Ex: dans notre cas $B = 0.0130 = 1,30 \cdot 10^{-2}$

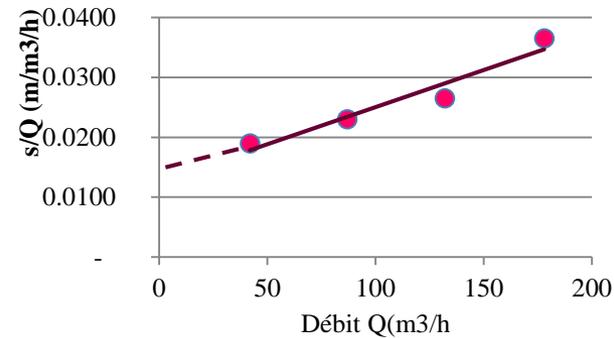
➤ Calcul du coefficient C

est égal à la pente de la droite représentative, $C = \text{tg } \alpha = a / b$

Ex: dans notre cas $C = (0.032 - 0.018) / 100 = 1,4 \cdot 10^{-4}$

Essai par paliers (Essai de puits) Exercice

Calcul des pertes de charge



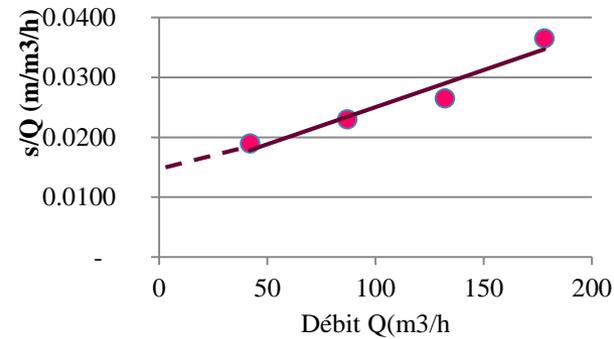
L'équation représentative de cet essai est donc:

$$s = BQ + CQ^2 = 1,30 \cdot 10^{-2} Q + 1,4 \cdot 10^{-4} Q^2$$

Les valeurs de B et C peuvent ensuite être utilisées dans l'équation 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 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.

Essai par paliers (Essai de puits) Exercice



Calcul des rabattements pour des débits donnés

nous appliquerons l'équation représentative de cet essai en remplaçant Q par les débits de l'exercice :

$$s = BQ + CQ^2 = 1,30 \cdot 10^{-2} Q + 1,4 \cdot 10^{-4} Q^2$$

Débit (m^3/h)	Rabattement (m)
20	0.32
50	0.1
100	2.7

Remarque:

Si les valeurs obtenues portées sur le graphique débit/rabattement se superposent parfaitement à la courbe observée, l'essai de puits est correct.

Essai par paliers (Essai de puits) Exercice



Expression expérimentale de Gosselin

Cette expression est appliquée aux sondages profonds dans les aquifères à nappe captive :

$$Q = Cs^{\alpha}$$

α : Coefficient compris entre 0.5 et 1

Cette équation est résolue en portant graphiquement les valeurs de débit (Q) et des rabattements correspondants (s) sur un papier bilogarithmique à modules égaux.

La droite représentative obtenue a pour équation:

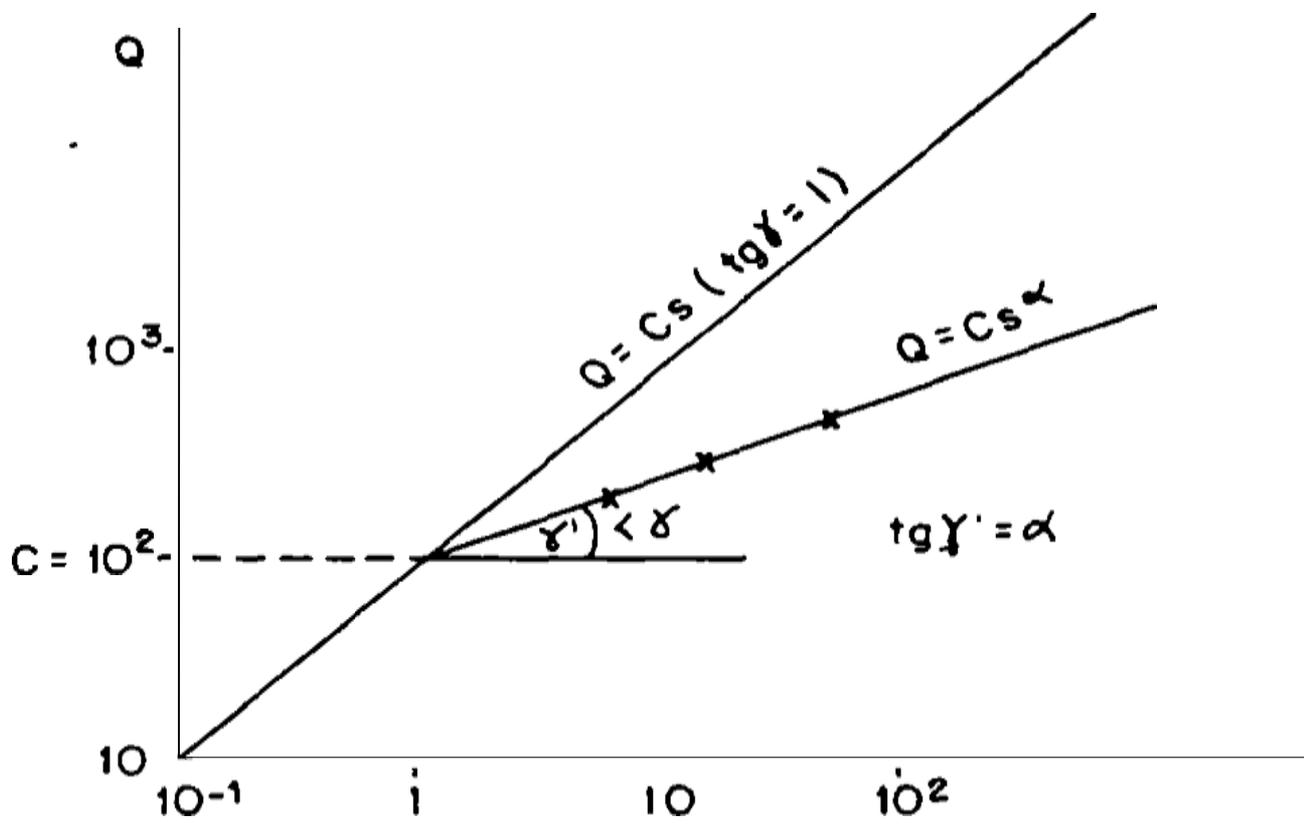
$$\log Q = \alpha \log s + \log C$$

Le coefficient angulaire donne la valeur α , la constante (C) est lue sur l'axe des débits pour un rabattement s égal à 1m.

Essai par paliers (Essai de puits) Exercice



Expression expérimentale de Gosselin



Essai par paliers (Essai de puits) Exercice



Expression expérimentale de Gosselin

Si les pertes de charge linéaires interviennent, la droite passe par l'origine, la pente de la droite représentative est égale à la tangente de 45° ($\text{tg } 45^\circ = 1$), l'équation se réduit alors à :

$$Q = Cs$$

Les débits sont proportionnels aux rabattements.

Remarque: cette relation est vérifiée pour des rabattements faibles comparés à la hauteur d'eau (H) dans le sondage avant pompage,
 $s \leq 0.75H$



**MERCI POUR VOTRE
ATTENTION !**

Dr. K. BABA-HAMED